



Universidad
Carlos III de Madrid

Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

Estudio de la propagación de grietas en ejes ferroviarios con MEF

Autor: Jesús Revenga Cervantes

Tutores: Higinio Rubio Alonso

Alejandro Bustos Caballero

Leganés, octubre de 2015



Título: Estudio de la propagación de grietas en ejes ferroviarios con MEF.

Autor: Jesús Revenga Cervantes.

Tutores: Higinio Rubio Alonso y Alejandro Bustos Caballero

EL TRIBUNAL

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día ____ de ____
de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de
Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



AGRADECIMIENTOS

Este proyecto nunca habría sido posible sin la ayuda y la paciencia, sobre todo en los últimos momentos, de mis padres y mi hermana, que siempre confiaron en mí, por lo que les quiero agradecer ese gran esfuerzo en soportar mal genio en momentos de estrés.

Por supuesto, no puedo dejar de agradecerle a mi tutor Higinio Rubio Alonso esa dedicación prestada hasta el último momento, y que ha permitido que este proyecto salga adelante.

Por último, ha pasado tanto tiempo desde que esto comenzó que ya ni recuerdo cuanta gente ha pasado por mi lado y me ha ofrecido su interés y apoyo, a todos ellos y ellas, a los de verdad, gracias.



RESUMEN

El principal objetivo de este proyecto es calcular y analizar el fallo de un eje ferroviario a través de la simulación por elementos finitos en Abaqus. En concreto, se diseñará un eje ferroviario y se le someterá a diferentes cargas hasta conseguir el fallo del material y estudiar el inicio y propagación de la grieta.

Para llevar a cabo el proyecto:

- Se recopilará documentación sobre ejes ferroviarios, mecánica de la fractura y sobre el uso del programa informático ABAQUS.
- Se realizará un pequeño manual sobre el programa informático debido a la poca existencia de dicho material.
- Se implementará el diseño del eje en un modelo 3D, desarrollado sobre el programa informático ABAQUS.
- Se simulará el fallo del material mediante la aplicación de elementos finitos ABAQUS.
- Se analizará y estudiará el resultado obtenido.



ABSTRACT

The main objective of this project is to calculate and analyze the failure of a rail link through the finite element simulation in Abaqus. Specifically, a rail link will be designed and subjected different loads until the failure of the material and study the propagation of the crack.

To carry out the project:

- Railways documentation, fracture mechanics and the use of ABAQUS software was collected.
- A small manual on the software due to the low presence of such material is made.
- The shaft design a 3D model developed on ABAQUS software was implemented.
- The failure of the material will be simulated by applying ABAQUS finite element.
- It will analyze and study the result.



ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	14
1.1.	ÁMBITO Y MOTIVACIÓN.....	15
1.2.	OBJETIVOS.....	17
1.3.	ESTRUCTURA DEL PROYECTO.....	18
2.	COMPLEMENTOS TEÓRICOS.....	19
2.1.	ANÁLISIS DE LA FRACTURA.....	20
2.1.1.	MECÁNICA DE LA FRACTURA.....	20
2.1.2.	GENERALIZACIÓN DE LA TEORÍA DE GRIFFITH.....	21
2.1.3.	RESISTENCIA A FRACTURA EN UNA GRIETA ELÍPTICA BAJO TENSIÓN UNIFORME.....	22
2.1.4.	LIMITACIONES DEL ANÁLISIS DE GRIFFITH.....	23
2.1.5.	PROPAGACIÓN DE FISURAS. MECÁNICA DE LA FRACTURA DE IRWIN.....	24
2.1.6.	FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES.....	25
2.1.7.	VELOCIDAD DE LIBERACIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA.....	28
2.1.8.	EQUIVALENCIA ENTRE G Y K.....	30
2.1.9.	SUPERPOSICIÓN DE G Y K.....	31
2.1.10.	GENERALIZACIÓN DE LA TEORÍA DE GRIFFITH.....	32
3.	HERRAMIENTAS EMPLEADAS: MANUAL DE ABAQUS.....	34
3.1.	INTRODUCCION A ABAQUS.....	35
3.2.	CREACIÓN DE LA PIEZA.....	37
3.2.1.	MÓDULO PART.	37
3.3.	PROPIEDADES DEL MATERIAL.....	40
3.3.1.	MÓDULO PROPERTY.....	40
3.3.2.	MÓDULO ASSEMBLY.....	45
3.4.	ANÁLISIS.....	50
3.4.1.	MÓDULO STEP.....	50



3.4.2.	MÓDULO INTERACTION.....	96
3.4.3.	MÓDULO LOAD.....	103
3.4.4.	MÓDULO MESH.....	108
3.4.5.	RESULTADOS.....	117
3.4.6.	MÓDULO JOB.....	117
3.4.7.	MÓDULO VISUALIZATION.....	121
4.	METODOLOGÍA.....	123
4.1.	METODOLOGÍA.....	124
4.1.1.	GEOMETRÍA.....	124
4.1.2.	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	124
4.1.3.	METODOLOGÍA APLICADA.....	125
4.1.4.	METODOLOGÍA APLICADA A LAS CARGAS Y RESTRICCIONES.....	126
4.1.5.	METODOLOGÍA APLICADA AL ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE GRIETA EN ABAQUS.....	127
4.1.6.	METODOLOGÍA APLICADA A LA GENERACIÓN DE GRIETAS...	129
5.	METODOLOGÍA Y DESARROLLO.....	130
5.1.	DISEÑO DEL EJE FERROVIARIO EN ABAQUS.....	131
5.1.1.	MODELADO.....	131
5.1.2.	GEOMETRÍA.....	131
5.1.3.	PROPIEDADES DEL MATERIAL.....	135
5.1.4.	MONTAJE Y MALLADO.....	138
5.2.	ESTUDIO ESTÁTICO DE EJE EN ABAQUS.....	141
5.2.1.	MODELO DE ESTUDIO.....	141
5.2.2.	RESTRICCIONES.....	142
5.2.3.	CARGAS.....	143
5.2.4.	ANÁLISIS.....	145
5.3.	ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE GRIETA EN ABAQUS.....	146
5.3.1.	DEFINIR GRIETA.....	146
5.3.2.	CARGAS Y RESTRICCIONES	146
5.3.3.	MODELO DE ESTUDIO.....	147
5.3.4.	SALIDAS.....	147



5.3.5.	ANÁLISIS.....	148
5.4.	ESTUDIO DE EJE FISURADO EN ABAQUS.....	149
5.4.1.	POSICIÓN Y GEOMETRÍA DE LA GRIETA.....	149
5.4.2.	RESTRICCIONES Y CARGAS.....	152
5.4.3.	ANÁLISIS.....	152
6.	RESULTADOS.....	153
6.1.	RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO ESTÁTICO.....	154
6.2.	RESULTADOS PROPAGACIÓN DE GRIETA.....	159
6.3.	RESULTADOS EJE FISURADO.....	162
6.3.1.	RESULTADOS CON FISURA EN ZONA 1.....	162
6.3.2.	RESULTADOS CON FISURA EN ZONA 2.....	163
6.3.3.	RESULTADOS CON FISURA EN ZONA 3.....	166
6.3.4.	RESULTADOS CON FISURA EN ZONA 4.....	169
6.3.5.	RESULTADOS CON FISURA EN ZONA 5.....	170
7.	CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS.....	178
7.1.	CONCLUSIONES.....	179
7.2.	FUTUROS TRABAJOS.....	181
8.	PRESUPUESTO.....	182
8.1.	PRESUPUESTO.....	183
9.	REFERENCIAS.....	185
	ANEXO I.....	187



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – Imagen de propagación de grieta por el método FEM.....	15
FIGURA 2 – Geometría de las fisuras.....	22
FIGURA 3 – Esquema separación de una fisura.....	24
FIGURA 4 – Modos de fractura según Irwin.....	25
FIGURA 5 - Tensiones y deformaciones cerca de la grieta.....	28
FIGURA 6 – Esquema de la resistencia a propagación en distintos medios.....	32
FIGURA 7 – Vista Principal de ABAQUS/CAE.....	36
FIGURA 8 – Herramientas del módulo Part.....	38
FIGURA 9 – Ventana Create.....	39
FIGURA 10 – Ventana edición de material.....	41
FIGURA 11 – Ventana Section.....	43
FIGURA 12 – Ventana Crear perfil.....	44
FIGURA 13 – Módulo Assembly.....	45
FIGURA 14 – Ventana crear Step.....	51
FIGURA 15 – Detalle herramientas.....	96
FIGURA 16 – Ventana crear interacciones.....	98
FIGURA 17 – Ventana crear interacciones.....	99
FIGURA 18 – Ventana crear inercias.....	101
FIGURA 19 – Ventana crear cargas.....	103
FIGURA 20 – Ventana crear condiciones de contorno.....	104
FIGURA 21 – Ventana crear condiciones predefinidas.....	105
FIGURA 22 – Ventana crear amplitud.....	107



FIGURA 23 – Herramientas de mallado.....	108
FIGURA 24 – Ventana tamaño de nodo.....	109
FIGURA 25 – Ventana asignación tipo de malla.....	110
FIGURA 26 – Ventana Element Type.....	112
FIGURA 27 – Ventana Bottom-Up.....	114
FIGURA 28 – Ventana verificación mallado.....	115
FIGURA 29 – Remeshing Rule.....	116
FIGURA 30 – Herramientas del módulo Jobs.....	117
FIGURA 31 – Ventana edición Job.....	118
FIGURA 32 – Ventana Job Manager.....	119
FIGURA 33 – Ventana Adaptivity Process.....	120
FIGURA 34 – Pantalla módulo Visualization.....	121
FIGURA 35 – Eje ferroviario sometido a estudio.....	124
FIGURA 35.1 – Restricciones en una sección del eje.....	126
FIGURA 35.2 – Posición de las grietas.....	129
FIGURA 36 – Ventana Create Part.....	131
FIGURA 37 – Imagen pequeña del ¼ de eje.....	132
FIGURA 38 – Eje Creado.....	133
FIGURA 39 – Ventana edición final vaciado.....	134
FIGURA 40 – Aspecto taladros laterales.....	135
FIGURA 41 – Ventana Edit Material.....	136
FIGURA 42 – Herramientas del menú Property.....	138
FIGURA 43 – Ventana tamaño de grano.....	139
FIGURA 44 – Ventana elección tipo de malla.....	139
FIGURA 45 – Eje mallado.....	140



FIGURA 46 – Ventana edición Step.....	141
FIGURA 47 – Ventana condiciones de contorno.....	142
FIGURA 48 – Aplicación restricciones.....	143
FIGURA 49 – Superficie aplicación de carga.....	144
FIGURA 50 – Cargas y restricciones definitivas sobre el eje.....	145
FIGURA 51 – Aplicación de las restricciones.....	146
FIGURA 52 – Cargas aplicadas para el estudio de propagación de grieta.....	147
FIGURA 53 – Posición de las grietas.....	150
FIGURA 54 – Boceto de la generación de grieta en la posición 4.....	150
FIGURA 55 – Detalle de la grieta generada.....	152
FIGURA 56 – Distribución de tensiones Von Misses de la carga 5.....	154
FIGURA 57 – Detalle de la tensión de Von Misses en un corte longitudinal de la carga 5.....	155
FIGURA 58 – Desplazamientos en Carga 5.....	155
FIGURA 59 – Detalle desplazamiento Carga 5.....	156
FIGURA 60 – Tensión máxima en estudio estático.....	157
FIGURA 61 – Deformaciones máximas en estudio estático.....	158
FIGURA 62 – Inicio de Fractura.....	159
FIGURA 63 – Grieta propagada.....	160
FIGURA 64 – Propagación de tensión.....	161
FIGURA 65 – Deformación.....	161
FIGURA 66 – Tensión máxima para eje con fisura nº 1. Estudio 1.....	162
FIGURA 67 – Propagación de grieta para eje con fisura nº 1. Estudio 1.....	163
FIGURA 68 – Tensión máxima para eje con fisura nº 2. Estudio 4.....	164
FIGURA 69 – Tensión máxima para eje con fisura nº 2. Estudio 5.....	164



FIGURA 70 – Propagación de grieta para eje con fisura n° 2. Estudio 4.....	165
FIGURA 71 – Propagación de grieta para eje con fisura n° 2. Estudio 5.....	166
FIGURA 72 – Tensión máxima para eje con fisura n° 3. Estudio 7.....	167
FIGURA 73 – Tensión máxima para eje con fisura n° 3. Estudio 9.....	167
FIGURA 74 – Propagación de grieta para eje con fisura n° 3. Estudio 7.....	168
FIGURA 75 – Propagación de grieta para eje con fisura n° 3. Estudio 9.....	168
FIGURA 76 – Tensión máxima para eje con fisura n° 4. Estudio 10.....	169
FIGURA 77 – Propagación de grieta para eje con fisura n° 4. Estudio 10.....	170
FIGURA. 78 – Tensión máxima para eje con fisura n° 5. Estudio 13.....	171
FIGURA 79 – Propagación de grieta para eje con fisura n° 5. Estudio 13.....	172
FIGURA 80 – Tensiones máximas en grietas generadas.....	174
FIGURA 81 – Deformación máxima del eje.....	175
FIGURA 82 – Deformación máxima en la grieta.....	175
FIGURA 83 – Desplazamientos para frente de grieta en coordenada (0,0).....	176
FIGURA 84 – Desplazamientos para frente de grieta en coordenada Y 40 mm.	176
FIGURA 85 – Desplazamiento para frente de grieta.....	177



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 – Propiedades del acero.....	125
TABLA 2 – Tensiones y deformaciones plásticas.....	125
TABLA 3 – Cargas aplicadas y presiones en superficie.....	127
TABLA 4 – Posición del frente de grieta para cada fisura.....	128
TABLA 5 – Cargas aplicadas y presiones en superficie.....	142
TABLA 6 – Posición del frente de grieta para cada fisura.....	151
TABLA 7 – Resultado de las tensiones y deformaciones en el análisis estático.....	157
TABLA 8 – Resultados de las tensiones y deformaciones en los ensayos con grietas.....	173
TABLA 9 – Presupuesto.....	184



1. INTRODUCCIÓN

1.1. ÁMBITO Y MOTIVACIÓN

La propagación de grietas en objetos sometidos a cargas tanto estáticas como variables en el tiempo, sigue siendo un problema para el diseño de estructuras debido a la dificultad de predicción de fallo y su complejidad de detección una vez producidas.

El proceso de predicción del fallo así como su evolución son muy importantes en el diseño de ejes ferroviarios debido a que las fisuras pueden aparecer por errores en el diseño, fabricación o por fenómenos de fatiga al estar sometidos dichos ejes a cargas cíclicas y a una alta cantidad de ciclos a lo largo de su vida, en especial en la alta velocidad donde las nuevas aleaciones y nuevos diseños, generan un nuevo modelo de cargas a estudiar, elevando los costes de producción, de los ensayos de colapso y de inspecciones técnicas.

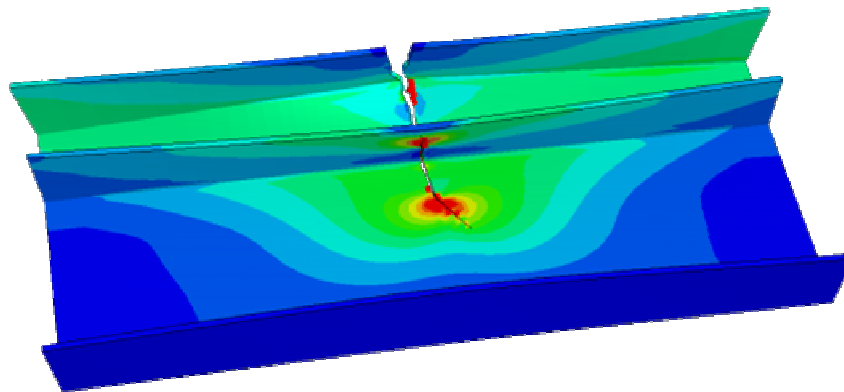


Fig. 1 – Imagen de propagación de grieta por el método FEM.

Sin embargo, el desarrollo de los sistemas de ingeniería asistida por ordenador, ha favorecido y agilizado el análisis de los modelos a estudiar, así como, ha permitido disminuir el número de ensayos empíricos con la reducción de costes que esto supone.

Por todo ello, se hace comprensible y necesario utilizar este tipo de software en el modelado de ejes ferroviarios, de hecho, en modelos de ejes ferroviarios ya estudiados y en los que se pueden comparar los resultados y usarlos en futuros modelos evitando incertidumbres.



En este caso, es decir, en este proyecto, se ha decidido estudiar la propagación de grietas mediante la herramienta ABAQUS, conjunto de programas de simulación por elementos finitos usado para la resolución de cálculos estructurales estáticos lineales y no lineales, dinámicos incluyendo simulación de impactos, problemas de contacto de sólidos, térmicos, acoplamientos acústico-estructurales, mecánica de fluidos, piezoeléctricos, etc. y que se va a utilizar para los cálculos debido a la gran capacidad de ejecución que posee.



1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto consiste en desarrollar un modelo de eje ferroviario hueco con dimensiones de uno real, realizar una simulación primaria del mismo y estudiar la propagación de una grieta producida en la superficie del eje utilizando el Método de los Elementos Finitos.

Para realizar las simulaciones y análisis del modelo de eje ferroviario empleando el Método de los Elementos Finitos se utilizará el software comercial ABAQUS.

Para alcanzar el objetivo principal, se realizarán los siguientes pasos:

- Creación de un manual de uso de ABAQUS, que pueda ser usado como un tutorial de uso rápido para cubrir la falta de literatura que existe sobre el manejo de dicho software. Para ello, se utiliza como base el manual de uso del propio software y la experiencia de uso conseguida durante este proyecto.
- Diseño detallado y explicado de un eje ferroviario mediante el uso del programa ABAQUS y simplificaciones aplicables para obtener unos resultados adecuados.
- Estudio tensional del eje ferroviario sometido a cargas estáticas.
- Estudio de la propagación de una grieta generada en la superficie de un eje ferroviario en régimen estático.
- Extender el estudio de la propagación de la grieta a diferentes zonas del eje ferroviario y con diferente profundidad.
- Análisis y comparación de los resultados obtenidos para establecer pautas de comportamiento.

Además de ABAQUS como software de análisis FEM también se utilizará la hoja de cálculo EXCEL para graficar los resultados.

1.3. ESTRUCTURA DEL PROYECTO

Este proyecto se estructura en diferentes capítulos para una mejor comprensión de lo expuesto.

En primer lugar lo que se va a desarrollar es una definición de los conceptos teóricos sobre el inicio y la propagación de grietas que se llevará a cabo en dicho estudio.

El siguiente capítulo es un manual de uso rápido del software ABAQUS diseñado para poder generar un análisis de elementos finitos partiendo del diseño hasta la visualización de resultados, en el que se hará hincapié en los métodos de estudio, conocidos como Step.

Posteriormente se explicará la metodología empleada en el estudio experimental del proyecto, es decir, los pasos llevados a cabo desde el diseño hasta obtener resultados.

Una vez explicada la metodología, se procederá a diseñar el eje ferroviario en ABAQUS paso a paso: diseño geométrico, asignación de materiales, creación de superficies para implantar cargas y mallado del elemento. Seguidamente se diseñará el estudio para cargas estáticas simulando varias cargas a las que se ve sometidas el eje, el análisis para la propagación de grieta una vez superada la tensión de rotura de dicho material y se crea el modelo de grietas a las que se somete el eje.

Se procederá a exponer los resultados obtenidos y se expondrán de forma gráfica para una visualización más intuitiva.

Se expresarán las conclusiones obtenidas tras el estudio realizado en el presente proyecto y se darán ideas para desarrollar futuros trabajos relacionados con este.

Finalmente, se expresará de forma cuantitativa el valor de un estudio como el llevado a cabo en este proyecto a través de la presentación de un presupuesto.



2. COMPLEMENTOS TEÓRICOS

2.1. ANÁLISIS DE LA FRACTURA

2.1.1. MECÁNICA DE LA FRACTURA

La mecánica de la fractura es la ciencia que estudia los mecanismos y procesos de propagación de grietas en sólidos, así como la distribución de tensiones y deformaciones que ocurren en un material agrietado o con discontinuidades sometido a cierta tensión externa.

Su origen se remonta a los estudios de Griffith durante la Primera Guerra Mundial cuando observó que la tensión a rotura de los materiales teórica y la tensión a rotura ingenieril diferían en gran medida, siendo la teórica muy superior.

Para demostrarlo, sugirió que la baja resistencia a la fractura observada en los experimentos era debida a la presencia de pequeñas roturas microscópicas en el material y por ello, introdujo fracturas en las probetas mayores que las que pudiese tener el material.

Al hacer dicho experimento detectó que la presencia de defectos en los materiales reales no invalida el criterio de tensión crítica, pero implica que, la fractura se produce cuando la tensión máxima en la punta de las grietas (y no la tensión macroscópica, mucho menor) alcanza la resistencia a fractura teórica (es decir, cuando $\sigma_c = \sigma_t$). Esto implica que la resistencia a fractura aparente, la que se mide macroscópicamente ($\sigma_f = \sigma_a$) sería:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_c = \sigma_t \\ \sigma_a = \sigma_f \end{array} \right\} \Rightarrow \sigma_t = \sigma_f 2\sqrt{\frac{c}{\rho}}$$

de donde γ_s es la energía por unidad de superficie y:

$$\sigma_f \approx \sqrt{\frac{\gamma_s E \rho}{a_0 c}}$$

y considerando que la curvatura en punta de grieta es del orden de la distancia interatómica ($\rho \approx a_0$) queda:

$$\sigma_f \approx \sqrt{\frac{\gamma_s E}{c}} \Rightarrow \sigma_f \propto c^{-1/2}$$

2.1.2. TEORÍA DE GRIFFITH.

El criterio de tensión crítica aplicado a la punta de la fisura es una condición necesaria, pero no suficiente, para que se propague una fisura. Además es necesario que esta propagación sea energéticamente favorable. Así mismo, el tratamiento utilizado para describir la fractura frágil era formalmente poco riguroso porque aplicaba teoría de la elasticidad en un rango atómico donde la aproximación de sólido continuo deja de ser aplicable. Estos problemas fueron sorteados por Griffith en 1920 al desarrollar su teoría de la fractura frágil a partir de consideraciones termodinámicas:

Considerado un sistema termodinámico reversible compuesto por un sólido elástico en cuyo contorno actúan determinadas fuerzas externas, y que contiene una fisura de longitud inicial c y superficie S . Suponiendo que dicha fisura experimenta un crecimiento o desplazamiento virtual dc . Según el Primer Principio de la Termodinámica:

$$dQ = dU + dW$$

Siendo Q el calor suministrado al sistema, U su energía interna y W trabajo realizado por el sistema sobre el medio ($W < 0$ si es trabajo realizado sobre el sistema). Asumiendo que la propagación de la fisura dc se produce rápidamente, se puede considerar que el proceso es adiabático ($dQ = 0$). Por otro lado la energía interna del sistema tiene dos contribuciones, la energía elástica y la energía superficial del medio:

$$U = U_E + U_S$$

Griffith consideró que la condición crítica para el crecimiento de la fisura es que los cambios energéticos asociados al crecimiento de la fisura se equilibren, es decir, que se minimice la energía del sistema:

$$\frac{d(U_E + U_S + W)}{dc} = \frac{dU}{dc} = 0$$

Cuando el sistema está fuera del equilibrio, si $\frac{dU}{dc} < 0$ la grieta crecerá

espontáneamente y si $\frac{dU}{dc} > 0$ la fisura tenderá a cerrarse, a decrecer.

2.1.3. RESISTENCIA A FRACTURA EN UNA GRIETA ELÍPTICA BAJO Tensión UNIFORME.

Utilizando este criterio de fractura, Griffith estimó la resistencia a fractura a partir de los resultados de Inglis para una grieta elíptica bajo tensión uniforme:

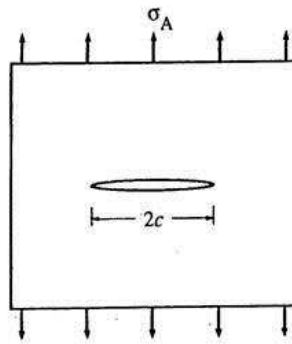


Fig. 2 – Geometría de las fisuras

Considerada una lámina de espesor unidad con fisura pasante. La energía superficial asociada a la fisura (ignorando el resto de superficies pues no varían) viene dada por:

$$U_S = 4 \gamma c$$

Utilizando la teoría de la elasticidad se puede demostrar que el trabajo realizado a carga constante por el sistema al crecer la fisura es:

$$dW = -2 dU_E$$

Por tanto:
$$U = U_E + U_S + W = U_S - U_E$$

Por otro lado, es posible demostrar que:

$$U_E = \frac{\pi c^2 \sigma_A^2}{E'}$$

con $E' = E$ si la lámina es delgada (estado de tensión plana) y $E' = E/(1-\nu^2)$ si la lámina es

gruesa (estado de deformación plana). Entonces:

$$U(c) = -\frac{\pi c^2 \sigma_A^2}{E'} + 4\gamma c$$

U_E decrece con c^2 mientras que U_S crece linealmente con c , es decir, conforme la fisura crece una región de radio aproximadamente igual a c se descarga entorno a la punta de fisura y la energía elástica liberada se emplea en crear las nuevas superficies. Aplicando la condición de equilibrio de Griffith:

$$\left. \frac{dU}{dc} \right|_{c=c^*, \sigma_A=\sigma_f} = 0 \Rightarrow \sigma_f = \sqrt{\frac{2E'\gamma}{\pi c^*}}$$

Este valor de resistencia a fractura es coherente con el valor obtenido a partir de las tensiones en punta de fisura pero el tratamiento seguido para calcularlo es más riguroso. En este caso, se cumple que:

$$\left. \frac{d^2U}{dc^2} \right|_{c=c^*, \sigma_A=\sigma_f} < 0$$

se trata de un máximo de energía y, por tanto, el sistema estaría en equilibrio inestable: mientras $\sigma_A < \sigma_f$ la fisura no crece, pero si $\sigma_A > \sigma_f$ la fisura crece hasta el final sin necesidad de incrementar la tensión (crecimiento inestable).

2.1.4. LIMITACIONES DEL ANÁLISIS DE GRIFFITH.

De nuevo, a la hora de determinar la resistencia a fractura, σ_f , a partir de la teoría de Griffith se ha recurrido a resultados de teoría elástica, que no son válidos estrictamente en punta de fisura. El propio concepto de punta de fisura no está claro. En teoría elástica se asume que la punta de fisura está bien definida y que no existen fuerzas de atracción entre las superficies opuestas de la fisura, lo cual no es estrictamente cierto, por tanto, los resultados de teoría de fractura expresados no son aplicables cerca de la punta de fisura.

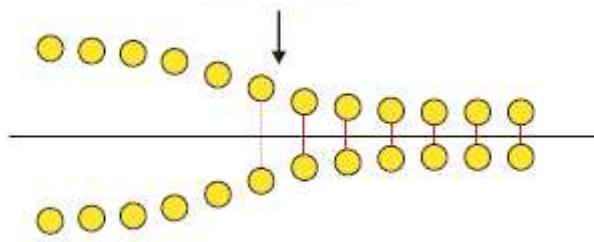


Fig. 3 – Esquema separación de una fisura.

Por consiguiente, es necesario distinguir dos regímenes en la evolución de las fisuras:

- Inicio o nucleación: Este régimen inicial es muy complejo de describir y está gobernado por fuerzas locales que se denominan fuerzas de nucleación.
- Propagación: El crecimiento de la fisura más allá de la región donde actúan las fuerzas de nucleación, es decir, el crecimiento de fisuras bien desarrolladas. Las complejas fuerzas de nucleación no intervienen en este segundo régimen.

2.1.5. PROPAGACIÓN DE FISURAS. MECÁNICA DE LA FRACTURA DE IRWIN.

En 1957, Irwin estableció con un formalismo más correcto la equivalencia entre la formulación energética y la formulación basada en tensiones de la mecánica de la fractura para la descripción del proceso de propagación de fisuras.

Para comenzar el estudio de la mecánica de la fractura de Irwin, conviene identificar la existencia de tres modos de fractura, que se corresponden con la separación de las dos superficies de fractura en cada una de las tres direcciones del espacio, estos modos se pueden dar solos o una combinación de dos o tres:

- Modo I: Modo de apertura y se caracteriza porque los labios de la fisura se desplazan en la dirección perpendicular al plano de la fisura en sentidos opuestos.
- Modo II: Modo de deslizamiento, los labios de la fisura se desplazan por el plano de la misma en la dirección longitudinal y sentidos opuestos.

- Modo III: Modo de desgarro, los labios de la fisura se desplazan por el plano de la misma en la dirección transversal y en sentidos opuestos.

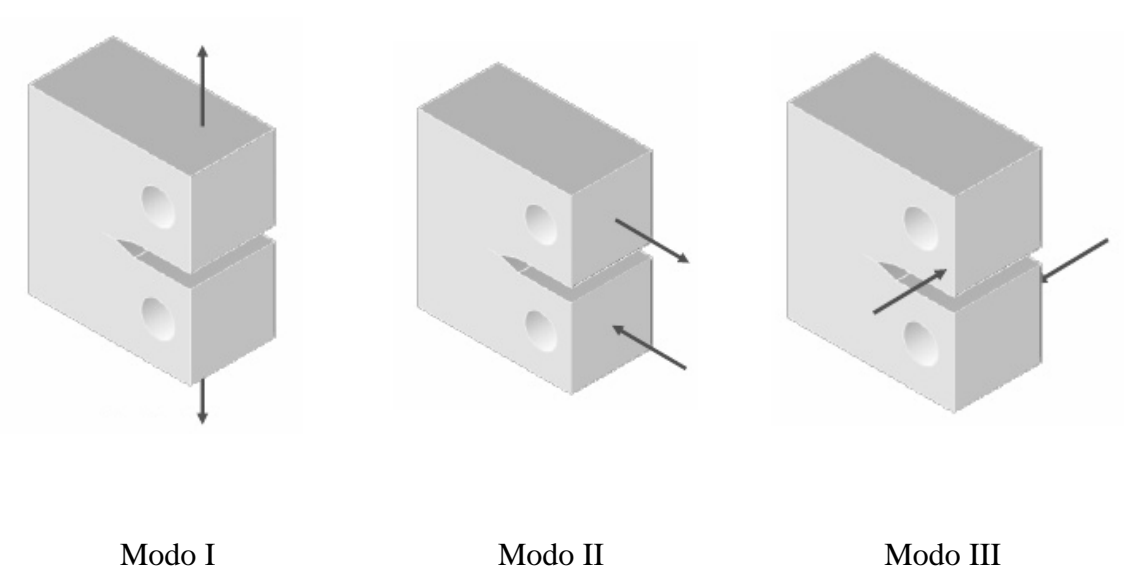


Fig. 4 – Modos de fractura según Irwin.

El modo de fractura dominante depende de la orientación del defecto respecto al campo de tensiones pero también del tipo de material.

2.1.6. FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES.

A partir de los resultados de Westergaard (1939), Irwin estableció que la distribución de tensiones completa entorno a una fisura puede escribirse, en primera aproximación (Primer término del desarrollo en serie) como:

Modo I:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \begin{Bmatrix} \cos(\theta/2) [1 - \sin(\theta/2) \sin(3\theta/2)] \\ \cos(\theta/2) [1 + \sin(\theta/2) \sin(3\theta/2)] \\ \sin(\theta/2) \cos(\theta/2) \cos(3\theta/2) \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{r\theta} \end{Bmatrix} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \begin{Bmatrix} \cos(\theta/2) [1 + \sin^2(\theta/2)] \\ \cos^3(\theta/2) \\ \sin(\theta/2) \cos^2(\theta/2) \end{Bmatrix} \\ \sigma_{zz} &= \nu'(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) = \nu'(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}) \\ \sigma_{xz} &= \sigma_{yz} = \sigma_{rz} = \sigma_{\theta z} = 0 \\ \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} &= \frac{K_I}{2E} \left\{ \frac{r}{2\pi} \right\}^{1/2} \begin{Bmatrix} (1+\nu)[(2\kappa-1)\cos(\theta/2) - \cos(3\theta/2)] \\ (1+\nu)[(2\kappa+1)\sin(\theta/2) - \sin(3\theta/2)] \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} u_r \\ u_\theta \end{Bmatrix} &= \frac{K_I}{2E} \left\{ \frac{r}{2\pi} \right\}^{1/2} \begin{Bmatrix} (1+\nu)[(2\kappa-1)\cos(\theta/2) - \cos(3\theta/2)] \\ (1+\nu)[-(2\kappa+1)\sin(\theta/2) + \sin(3\theta/2)] \end{Bmatrix} \\ u_z &= -(\nu''z/E)(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) = -(\nu''z/E)(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}). \end{aligned}$$

Modo II:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} &= \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \begin{Bmatrix} -\sin(\theta/2) [2 + \cos(\theta/2) \cos(3\theta/2)] \\ \sin(\theta/2) \cos(\theta/2) \cos(3\theta/2) \\ \cos(\theta/2) [1 - \sin(\theta/2) \sin(3\theta/2)] \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{r\theta} \end{Bmatrix} &= \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \begin{Bmatrix} \sin(\theta/2) [1 - 3\sin^2(\theta/2)] \\ -3\sin(\theta/2) \cos^2(\theta/2) \\ \cos(\theta/2) [1 - 3\sin^2(\theta/2)] \end{Bmatrix} \\ \sigma_{zz} &= \nu'(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) = \nu'(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}) \\ \sigma_{xz} &= \sigma_{yz} = \sigma_{rz} = \sigma_{\theta z} = 0 \\ \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} &= \frac{K_{II}}{2E} \left\{ \frac{r}{2\pi} \right\}^{1/2} \begin{Bmatrix} (1+\nu)[(2\kappa+3)\sin(\theta/2) + \sin(3\theta/2)] \\ -(1+\nu)[(2\kappa-3)\cos(\theta/2) + \cos(3\theta/2)] \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} u_r \\ u_\theta \end{Bmatrix} &= \frac{K_{II}}{2E} \left\{ \frac{r}{2\pi} \right\}^{1/2} \begin{Bmatrix} (1+\nu)[-(2\kappa-1)\sin(\theta/2) + 3\sin(3\theta/2)] \\ (1+\nu)[-(2\kappa+1)\cos(\theta/2) + 3\cos(3\theta/2)] \end{Bmatrix} \\ u_z &= -(\nu''z/E)(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) = -(\nu''z/E)(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}). \end{aligned}$$

Modo III:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \sigma_{yy} = \sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{zz} = 0 \\ \sigma_{xy} &= \sigma_{r\theta} = 0 \\ \begin{Bmatrix} \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{Bmatrix} &= \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} \begin{Bmatrix} -\sin(\theta/2) \\ \cos(\theta/2) \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} \sigma_{rz} \\ \sigma_{\theta z} \end{Bmatrix} &= \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} \begin{Bmatrix} \sin(\theta/2) \\ \cos(\theta/2) \end{Bmatrix} \\ u_x &= u_y = u_r = u_\theta = 0 \\ u_z &= (4K_{III}/E)(r/2\pi)^{1/2} [(1+\nu)\sin(\theta/2)]. \end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{cases} \kappa = \frac{3-\nu}{1+\nu}, \quad \nu' = 0, \quad \nu'' = \nu & \text{(tensión plana)} \\ \kappa = 3-4\nu, \quad \nu' = \nu, \quad \nu'' = 0 & \text{(deformación plana)} \end{cases}$$

Todas estas expresiones pueden escribirse de forma compacta como:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_m}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij,m}(\theta)$$

Así mismo, los desplazamientos pueden expresarse como:

$$u_{i,m} = \frac{K_m}{2E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} f_{i,m}(\theta)$$

Donde K_m es el **factor de intensidad de tensiones**, que depende del modo de fractura y de las condiciones de contorno aplicadas. El factor de intensidad de tensiones, como su nombre indica, es la magnitud que determina la intensidad de las tensiones locales entorno a la fisura. Esta magnitud es la fuerza motriz de la propagación de la fisura y cuando se igual o supera un valor crítico, es cuando se produce la propagación de grieta.

Conviene notar que las tensiones varían con $r^{-1/2}$ mientras que los desplazamientos lo hacen con $r^{1/2}$, independientemente de las condiciones externas. Ello implica que las tensiones justo en punta de fisura serían infinitas, lo que significa que este tratamiento no es aplicable muy cerca de la punta de fisura. Además, tampoco es aplicable lejos de la fisura puesto que se necesitarían términos de orden superior en el desarrollo en serie que se han despreciado para obtener las ecuaciones anteriores.

En definitiva, la mecánica de fractura de Irwin, sólo es aplicable a la propagación y no a la nucleación de fisuras y no pretende poder calcular qué sucede en regiones alejadas de la fisura ya que lo que suceda en estas regiones no afecta a su propagación.

2.1.7. VELOCIDAD DE LIBERACIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA.

La mecánica de la fractura de Irwin puede enunciarse de forma equivalente en términos energéticos. Para ello, Irwin define el concepto de velocidad de liberación de energía mecánica, G , como la energía mecánica liberada por unidad de superficie de fractura:

$$G = -\frac{dU_M}{dS} \quad (U_M = U_E + W)$$

que considerando una longitud de frente de grieta unitaria puede escribirse alternativamente como:

$$G = -\frac{dU_M}{dc}$$

G tiene dimensiones de energía/área o fuerza/longitud y es la fuerza motriz de la propagación de fisuras. Cuanta más energía mecánica se libere al aumentar la longitud de la fisura, más favorable será dicha propagación. La velocidad de liberación de energía mecánica es independiente de la configuración de cargas:

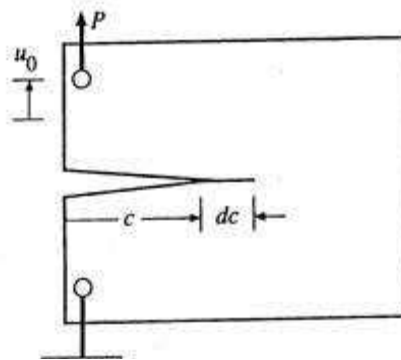


Fig. 5 – Tensiones y deformaciones cerca de la grieta.

Suponiendo un sistema como el de la figura 5. El desplazamiento sufrido dependerá de la carga aplicada y de la flexibilidad (compliance) del sistema, $\lambda = \lambda(c)$:

$$u = \lambda P$$

La energía elástica del sistema será:

$$U_E = \int_0^u P(u) du = \frac{1}{2} \frac{u^2}{\lambda} = \frac{1}{2} \lambda P^2$$

Si el sistema evoluciona a **carga constante**, cuando la fisura crece dc la flexibilidad, λ aumenta y

$$dU_E = \frac{1}{2} P^2 d\lambda$$

Por otro lado,

$$du = \lambda dP + P d\lambda \xrightarrow{P=cte} P d\lambda$$

y por tanto

$$dW = -P du = -P^2 d\lambda$$

Al tratarse de un trabajo realizado sobre el sistema es negativo. Como se ve y verifica lo que se había comentado anteriormente:

$$dW = -2dU_E.$$

Finalmente, se obtiene:

$$dU_M = -\frac{1}{2} d\lambda P^2$$

Si, en cambio, el sistema evoluciona a desplazamiento constante, λ sigue aumentando cuando la fisura crece dc , pero ahora:

$$dU_E = -\frac{1}{2} \frac{u^2}{\lambda^2} d\lambda = -\frac{1}{2} d\lambda P^2$$

Por otro lado, al ser a desplazamiento constante, $du=0$, el trabajo realizado es nulo ($W=0$) por lo que finalmente:

$$dU_M = -\frac{1}{2} d\lambda P^2$$

Por tanto, G tendría el mismo valor en ambos casos, que es lo que se quería

demostrar. Sin embargo, a carga constante $dU_M = -dU_E$, mientras que a desplazamiento constante $dU_M = dU_E$, es decir, lo que es invariante es la velocidad de liberación de energía mecánica, G , y no la velocidad de liberación de energía elástica, que en un caso es opuesta al otro. A pesar de tener el mismo valor de G , ambas configuraciones no son igualmente estables:

A $P = \text{cte}$:

$$G = -\frac{dU_M}{dc} = \frac{1}{2} P^2 \frac{d\lambda}{dc} \Rightarrow \frac{dG}{dc} = \frac{1}{2} P^2 \frac{d^2\lambda}{dc^2}$$

Mientras que para $u = \text{cte}$:

$$G = -\frac{dU_M}{dc} = \frac{1}{2} \frac{u^2}{\lambda^2} \frac{d\lambda}{dc} \Rightarrow \frac{dG}{dc} = \frac{1}{2} \frac{u^2}{\lambda^2} \frac{d^2\lambda}{dc^2} - \frac{u^2}{\lambda^3} \frac{d\lambda}{dc}$$

De esta forma, si $\lambda(c)$ es creciente con c , $d\lambda/dc > 0$, la derivada de G a desplazamiento constante será menor que la derivada de G a carga constante lo que implica que la configuración a desplazamiento constante produce fisuras más estables.

2.1.8. EQUIVALENCIA ENTRE G Y K .

Las dos formulaciones de la mecánica de la fractura de Irwin son equivalentes y por tanto debe existir una equivalencia entre las dos fuerzas motrices.

Se considera por simplicidad el caso de fractura a desplazamiento constante y en Modo I puro. La energía elástica liberada durante el crecimiento de la fisura ($C \rightarrow C'$) es equivalente al trabajo realizado por las tensiones entorno a la fisura durante un proceso hipotético de cierre de la fisura ($C' \rightarrow C$):

$$G = -\frac{dU_E}{dc} = \lim_{dc \rightarrow 0} -\frac{2}{dc} \int_{c+dc}^c \frac{1}{2} \left[\sigma_{yy}(r = x - c, \theta = 0) u_y(r = c + dc - x, \theta = \pi) \right] dx$$

Sustituyendo los valores de σ_{yy} y u_y correspondientes al modo I, se obtiene:

$$G = \frac{2K_I^2}{\pi E' dc} \int_c^{c+dc} \sqrt{\frac{c+dc-x}{x-c}} dx = \frac{2K_I^2}{\pi E' dc} \int_0^{dc} \sqrt{\frac{dc-y}{y}} dy$$

que haciendo los cambios $w=y/dc$ y posteriormente $w=\cos 2\phi$ conduce a:

$$G = \frac{4K_I^2}{\pi E'} \int_0^{\pi/2} \sin^2 \phi d\phi = \frac{4K_I^2}{\pi E'} \left[\frac{\phi}{2} - \frac{\sin 2\phi}{4} \right]_0^{\pi/2} = \frac{K_I^2}{E'}$$

Ecuaciones equivalentes se pueden obtener para todos modos de fractura:

$$G_I = \frac{K_I^2}{E'}, \quad G_{II} = \frac{K_{II}^2}{E'}, \quad G_{III} = \frac{K_{III}^2}{E'}(1+\nu)$$

con $E'=E$ si la lámina es delgada (tensión plana) y $E'=E/(1-\nu^2)$ si es gruesa (deformación plana).

2.1.9. SUPERPOSICIÓN DE G Y K.

Puesto que las tensiones del mismo tipo (cizalladura o normales) verifican el principio de superposición y pueden sumarse, también los factores de intensidad de tensiones correspondientes a un mismo modo de fractura se suman:

$$KI = KI^{(1)} + KI^{(2)} + KI^{(3)}$$

En cambio, cuando los modos de fractura son diferentes, los factores de intensidad de tensiones no pueden sumarse pero la energía liberada sí:

$$G = -\frac{dU_E}{dc} = \lim_{dc \rightarrow 0} -\frac{2}{dc} \int_{c+dc}^c \frac{1}{2} [\sigma_{yy} u_y + \sigma_{xy} u_x + \sigma_{zy} u_z] dx = \frac{K_I^2}{E'} + \frac{K_{II}^2}{E'} + \frac{K_{III}^2}{E'}(1+\nu) = G_I + G_{II} + G_{III}$$

Por eso es tan interesante la mecánica de la fractura de Irwin, porque utilizando bien la formulación en tensiones (K) o bien la energética (G) es posible aplicar el principio de superposición y se simplifica mucho la resolución de cualquier problema de fractura.

2.1.10. GENERALIZACIÓN DE LA TEORÍA DE GRIFFITH.

Para completar esta teoría, es necesario incorporar el concepto de balance energético de Griffith a la mecánica de la Fractura de Irwin.

Al igual que G caracteriza la energía mecánica disponible para la propagación de fisuras, se hace necesario definir una magnitud que represente la energía necesaria para que dicha propagación tenga lugar y que, en ausencia de otros fenómenos, se identifica con la variación de energía superficial del sistema por unidad de área, es decir, con el trabajo necesario para romper los enlaces:

$$R = \frac{dU_s}{dS} \cong \frac{dU_s}{dc}$$

Esta magnitud es la fuerza que se opone al crecimiento de la fisura (positiva), la fuerza de resistencia a la propagación de fisuras. Es decir, el trabajo necesario para separar dos superficies unitarias y crear las respectivas interfases con el medio que rodea al material o materiales. En el caso de un sólido homogéneo este trabajo se identifica con la energía superficial de cohesión (2 veces la tensión superficial, recordar la teoría de Griffith) y, si se trata de cuerpos distintos, con el trabajo de adhesión propiamente dicho, es decir, la diferencia entre las tensiones superficiales de los cuerpos por separado y la energía interfacial de la unión entre ambos materiales:

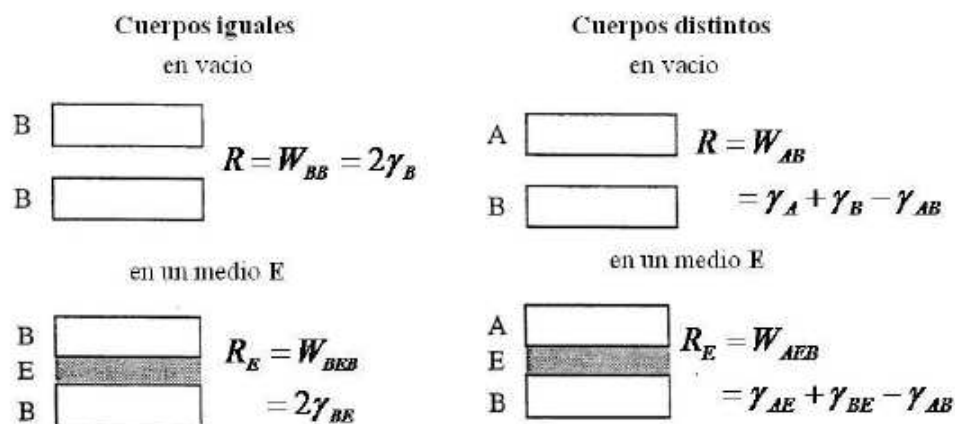


Fig. 6 – Esquema de la resistencia a propagación en distintos medios

Como se muestra en la figura 6, ambas magnitudes pueden modificarse en presencia de un medio E determinado, a este efecto pernicioso que en muchos casos tiene el entorno químico en la fractura de los materiales se le denomina fatiga química.

Teniendo en cuenta esto, la condición de equilibrio de Griffith queda expresada como:

$$dU = dU_M + dU_S = 0 = -GdS + RdS \Rightarrow G = R \equiv G_C$$

Es decir, la fractura se produce cuando G alcanza un cierto valor crítico ($G_C=R$) o, equivalentemente en la formulación en tensiones, cuando K lo alcanza:

$$K=K_C$$

Basta recordar que $G = \frac{K^2}{E'}$ (modos I y II). El valor crítico K_C se denomina tenacidad a fractura del material. Por tanto, según esta condición crítica, si $G > R$ ($K > K_C$) la fisura crece, mientras que si $G < R$ ($K < K_C$) la fisura se contrae.

La condición anterior es condición necesaria para que se produzca el fallo de una pieza, pero no suficiente. Para que la pieza falle, además, la propagación de la fisura ha de ser inestable, es decir, se debe cumplir que:

$$\frac{d^2U}{dc^2} < 0 \xrightarrow{R=cte} \frac{dG}{dc} > 0 \Leftrightarrow \frac{dK}{dc} > 0$$

donde el cambio de signo de “<” a “>” se debe al distinto signo entre U y G. Por supuesto, es posible que en un determinado sistema, debido al campo de tensiones que actúa sobre la grieta, se alternen periodos de propagación estable-inestable-estable... Estos diferentes periodos de crecimiento de las fisuras en un material reciben nombres como incubación (crecimiento estable inicial), pop-in (crecimiento inestable) o detención o arrest (frenado de la propagación de una fisura tras un crecimiento inestable o pop-in).



3. HERRAMIENTAS

EMPLEADAS:

MANUAL DE ABAQUS



3.1. INTRODUCCIÓN A ABAQUS

ABAQUS es un código de análisis por el Método de los Elementos Finitos de propósito general, orientado a la resolución de problemas no lineales. Fue desarrollado hace más de 20 años por la empresa Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. (HKS), y en la actualidad se utiliza para resolver grandes y complejos problemas de ingeniería.

ABAQUS puede ser utilizado para resolver problemas de resistencia de materiales, mecánica de fractura, ingeniería forense, procesos de conformado de metales, transferencia de calor, etc.

ABAQUS está estructurado en tres grandes bloques de trabajo, en correspondencia con las tres etapas en que se divide un problema para ser analizado por el Método de Elementos Finitos (preproceso, resolución y postproceso). Así mismo, el programa ABAQUS se encuentra dividido en cuatro módulos:

- ABAQUS/Standard, para resolución de problemas de propósito general. Incluye todas las posibilidades de análisis excepto el análisis dinámico.
- ABAQUS/Explicit, para resolución de problemas de tipo dinámico. Es poderoso por su eficiencia computacional en grandes modelos, y también altamente efectivo para aplicaciones cuasi-estáticas, pero ocupa una cantidad considerable de memoria.
- ABAQUS/CAE, módulo interactivo para la creación de modelos de elementos finitos. A través de este módulo se puede implementar un modelo de forma sencilla y rápida.
- ABAQUS/Viewer, módulo de visualización de soluciones. Muestra los resultados obtenidos una vez resuelto el problema.

Este manual se ha enfocado al aprendizaje de ABAQUS a partir de su entorno ABAQUS/CAE por su facilidad y versatilidad de uso y se plantea siguiendo los pasos necesarios para crear un análisis a partir de los módulos de trabajo.

El primer paso es familiarizarse con el entorno interactivo de ABAQUS/CAE.

En la página principal se pueden distinguir cinco zonas, ver figura 7:

- Barra de menú y de tareas: Herramientas para la gestión de archivos, selección, visualización del modelo y ayuda.
- Árbol de herramientas: Visualización jerarquizada del trabajo que se está realizando.
- Área de mensaje: Espacio donde se informa al usuario del estado del modelo y se advierte de errores.
- Ventana de trabajo: Área de visualización.

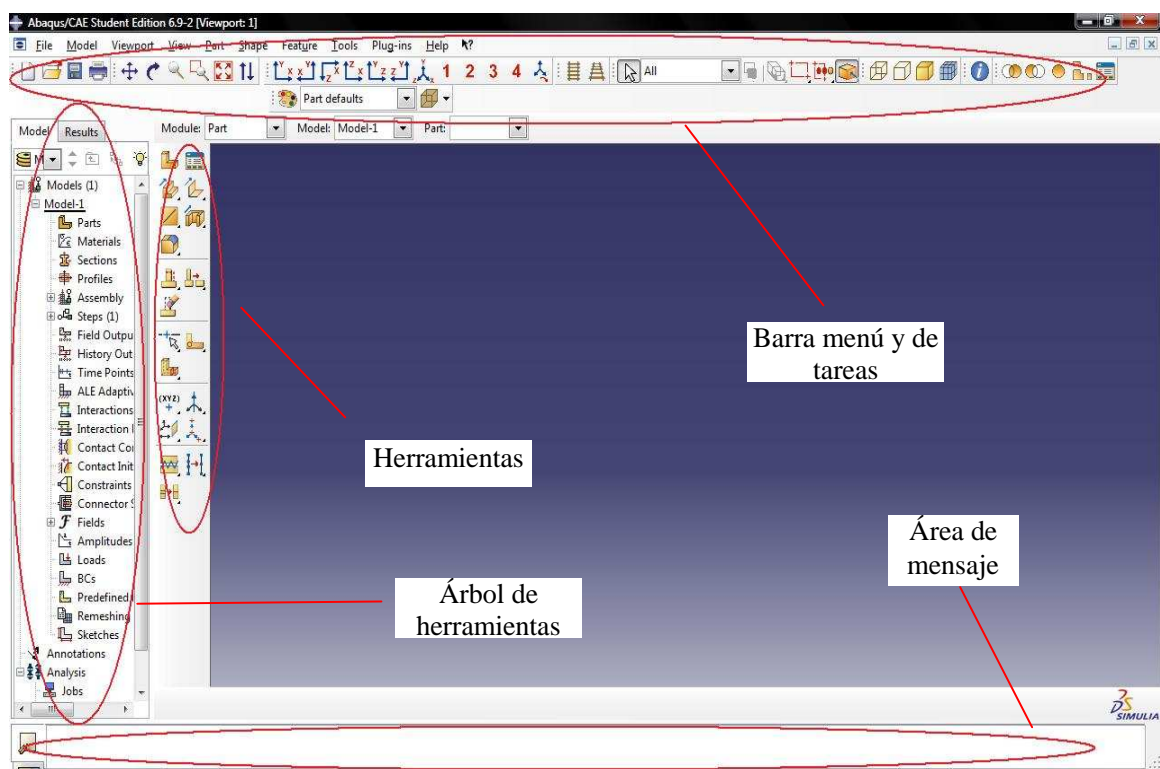


Fig. 7 - Vista principal de ABAQUS/CAE



3.2. CREACIÓN DE LA PIEZA

3.2.1. Módulo Part.

En el módulo Part es donde se crean las piezas, partes de ellas, vaciados, etc. que serán estudiadas. Son el componente básico para dicho estudio y es donde se diseñan las distintas piezas o se modifican las importadas, por lo que adquiere gran relevancia.

Existen las siguientes formas de crear una pieza:

1. Usando las herramientas disponibles del modulo Part.
2. Importando la pieza desde un archivo de otro formato.
3. Importando el mallado de la pieza desde un archivo de salida .odb.
4. Mediante corte o combinación de un Instance en el módulo Assembly.
5. Creando una pieza mallada en el modulo Mesh.

1. Usando las herramientas del módulo Part.

Al crear una pieza de esta manera, existe la posibilidad de modificar su geometría siempre que sea necesario. Es la estudiada debido a que permite crear una pieza desde la nada y así mismo, permite el estudio de todas las herramientas de dicho módulo, las cuales aparecen en la figura siguiente.

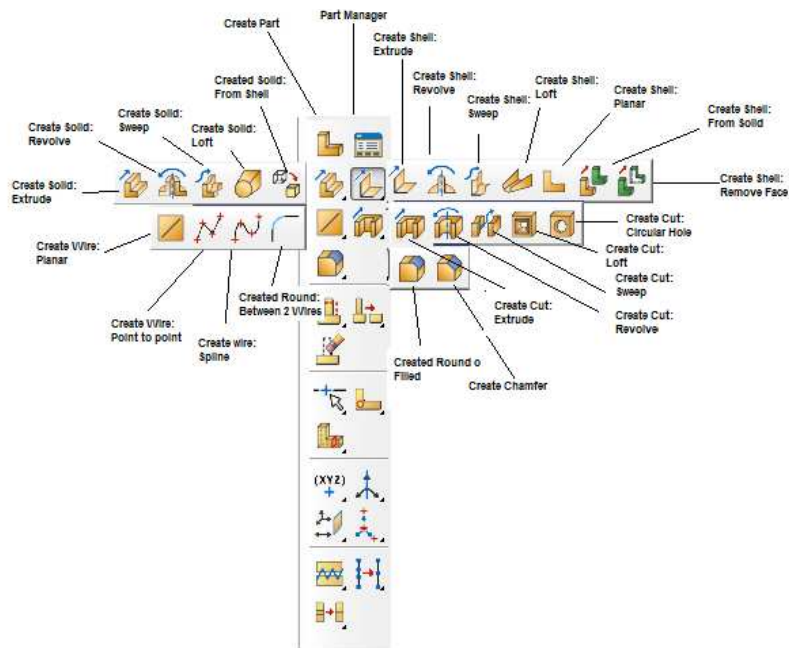


Fig. 8 - Herramientas del módulo Part.

En el Apartado Create, figura 9, es donde se elige tanto el nombre, la geometría como el tipo de la pieza 1D, 2D, 3D, si será un sólido, un alambre, una chapa; si será un cuerpo deformable, discreto e incluso la manera por la cual definiremos la geometría final , es decir, por extrusión, revolución, barrido.

Así mismo, este apartado permite dar un tamaño aproximado a la pieza para agilizar su diseño antes de diseñar la geometría.

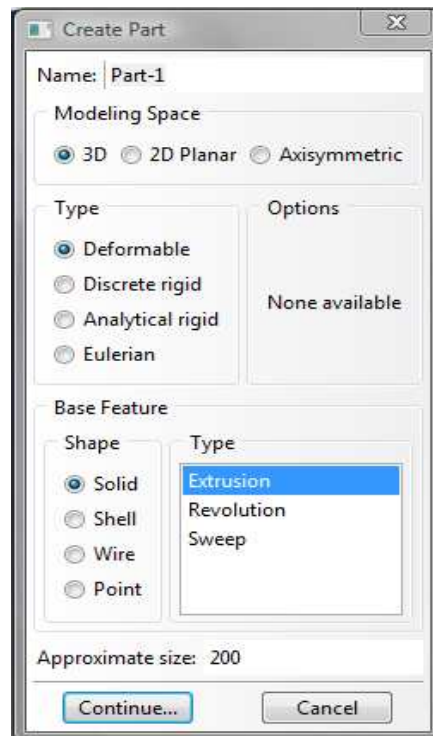


Fig. 9 – Ventana Create

Tras elegir como será la pieza, se entra a la interfaz Sketch, donde se diseña la geometría en 1D o 2D de la pieza y una vez obtenida se saldrá y finalizará pulsando Done.

Esta interfaz, Sketch, es muy sencilla de manejar y muy parecida a otras de otros muchos programas de diseño como son Solid Edge, Autocad o Solid Works.

Para realizar extrusiones, vaciados, particiones (mediante las cuales conseguir diferentes secciones y aplicarles distintas propiedades), se puede usar las herramientas del menú Part (ver figura 8).

3.3. PROPIEDADES DEL MATERIAL

3.3.1. Módulo Property:

En el módulo Property, se diseñan y/o asignan las siguientes características:

Definición de material, definición de secciones, definición de sección de perfil de vigas, asignación de perfiles, orientación, definición de refuerzos, definición de inercia, definición de spring y dashpots.

MATERIALS:

Una vez diseñada o importada la pieza o piezas que van a ser usadas en el estudio, es el momento de asignar las propiedades del material para su futuro estudio.

La elección del material es muy importante ya que decidirá la reacción y el resultado del análisis.

- Propiedades generales (Amortiguamiento del material, densidad, expansión térmica).
- Propiedades elásticas.
- Propiedades inelásticas.
- Propiedades térmicas.
- Propiedades acústicas.
- Propiedades para fluidos hidrostáticos.
- Propiedades de difusión de masa.
- Propiedades eléctricas.
- Ecuaciones de estado.

Para crear un material es necesario entrar desde el menú **Material** → **Create** o directamente pulsando en el botón **Materials** del árbol.

En la ventana de edición, figura 10, aparecerán las opciones para asignar nombre y una descripción, así como un cuadro donde aparecerán las opciones y propiedades de materiales escogidas del menú inferior **Behavior Menu**. (Se debe recordar que Abaqus es un software que no trabaja con unidades específicas y hay que tener cuidado a la hora de escribir los parámetros de las propiedades).

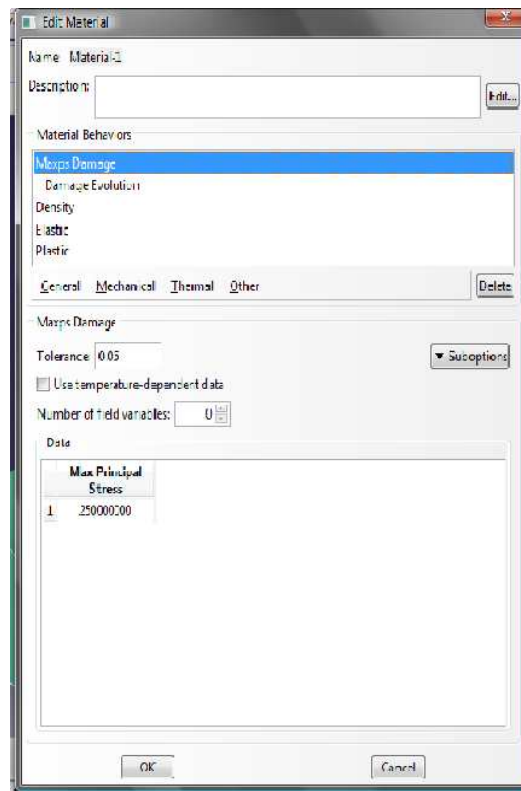


Fig. 10 – Ventana edición de material.

SECTIONS:

Section contiene información acerca de las propiedades de un part o una región del part. Es necesario crear una sección para aplicar a la pieza o part las propiedades de los materiales definidos en Materials y así obtener resultados coherentes en el estudio. Estas secciones son independientes de cualquier part, region o assembly por lo que se pueden asignar a tantas zonas como sean necesarias pero manteniendo una coherencia con las propiedades físicas.

Las categorías de las secciones son:

- Solid: Define las secciones de propiedades de los sólidos axiales, 2-d y 3-d.
- Shell: Define las secciones Shell donde el espesor de una capa es significativamente menor que las otras 2 y con tensión en la capa insignificante.
- Beam: Define estructuras delgadas en 2 o 3 dimensiones, sólo se pueden asignar estas secciones a regiones tipo Wire.
- Other: Define las secciones que incluyen juntas, uniones (gasket y cohesive secciones) y elementos acústicos.

Otra posibilidad dentro del apartado sections radica en la orientación:

- Assign beam orientation: Asigna la orientación de la sección de la viga.
- Assign Material orientation: Permite asignar una orientación a los materiales tanto de tipo Shell como Solids. La orientación por defecto la determina el sistema de coordenadas globales y se puede cambiar seleccionando otras coordenadas creadas anteriormente (datum coordinate).
- Assign Rebar reference orientation: Esta opción es usada en elementos tipo Shell y permite cambiar la orientación creando unas coordenadas locales. Esta opción asigna la orientación angular del refuerzo (o rebar).
- Assign Shell/Membrane Normal: Asigna la dirección normal de regiones Shell (membrane y wire partes).
- Assigning Beam/truss tangential: Asigna la dirección tangencial de vigas.

Para crear una sección, se accede desde el menú **Section** → **Create** o directamente pinchando en el icono correspondiente en el árbol de herramientas. Aparecerá la ventana **Create Section**, figura 11, donde se nombrará la sección, se le aplicará una categoría y un tipo (se debe recordar que la sección debe ir acorde con el tipo de material y pieza).

Inmediatamente después, aparecerá otra ventana **Edition Section** donde se aplicará el material y las distintas propiedades que fuese necesario.

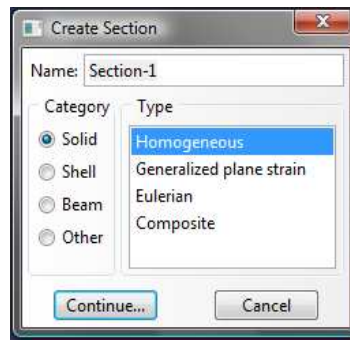


Fig. 11 – Ventana Section

Una vez creada la sección, esta debe ser asignada, para ello, mediante el menú **Section** → **Assignment** o el icono **Assign Section** se siguen las especificaciones que Abaqus nos indica para llegar a la asignación final y el resultado será visible porque esa región cambiará de color. Hay que recordar que una sección puede ser asignada a diferentes regiones o parts.

PROFILES:

En profiles se especifican las propiedades relacionadas con el tamaño y perfil de las secciones de las vigas. Existen varios modelos de perfiles, ver figura 12, a disposición del usuario, así mismo, si el perfil deseado no se encuentra disponible existen 2 opciones para generar perfiles, Arbitrary y Generalized. Los perfiles sólo se aplican a piezas tipo Wire.

- **Arbitrary Profile:** Permite crear perfiles de sección abierta o cerrada de fino espesor, a través de la inserción de coordenadas punto a punto.
- **Generalized Profile:** Crea un perfil aplicándole las propiedades ingenieriles de la sección directamente, como el área, momentos de inercia, constante de torsión....

Una vez creado el perfil, este deberá ser asignado en la sección cuando se genere esta.

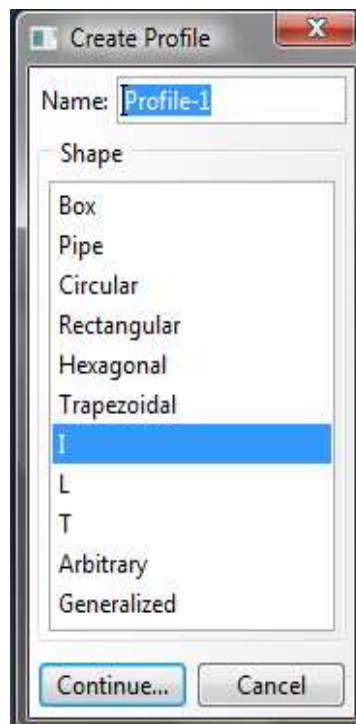


Fig. 12 – Ventana Crear perfil

3.3.2. MÓDULO ASSEMBLY

En el módulo Assembly, figura 13, es donde se crean las instances y se ordenan todas las piezas dentro de un mismo sistema global de coordenadas creando así un conjunto de piezas. Es decir, cuando se crea un Part, este existe pero en su propio sistema de coordenadas, por lo que para poder trabajar con él hay que crear una o varias Instances, dependiendo de las necesidades y/o si son varias piezas las que forman un conjunto, etc. Así mismo, en este módulo se pueden rotar, fijar y desplazar las part según necesidad.

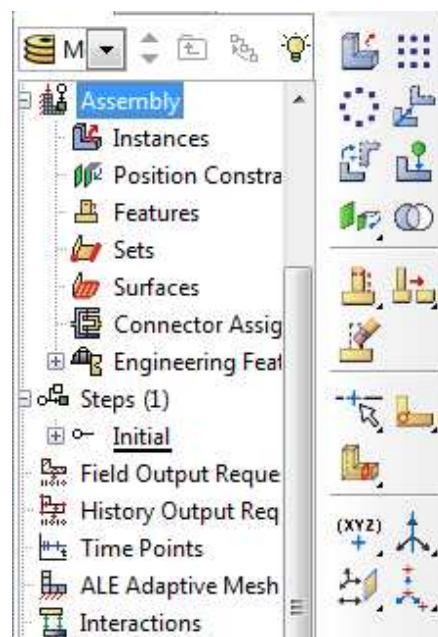


Fig. 13 – módulo Assembly

Desde **Instante**→**Create** se definen los Instantes, que pueden ser Dependientes, aparece por defecto, o Independientes:

Las Dependientes son sólo una proyección de la pieza original, tiene la misma geometría y el mallado de la pieza original y cuando se generan varios Instances Dependent, Abaqus asigna el mismo mallado a todos ellos.

Se pueden modificar los atributos del mallado (de la pieza original y esta se propagaran a todos los instances) tales como número de nodos, tipo de mallado etc., realizar operaciones que no modifiquen la geometría tales como sets, cargas, etc.

Las Instances independientes son copias geométricas de las originales part, obligan



a mallar los instances en vez de las piezas, pero por el contrario, permite más operaciones, tales como crear particiones y topología virtual.

La decisión de qué tipo de Instance dependerá del usuario, es importante mencionar que las instances dependientes ocupan muchísima menos memoria que las independientes y que si se tienen pocas y sencillas piezas el dependiente facilita los cálculos. Además, una vez mallada la pieza, si se realizó a partir de un Dependent Instance, puede cambiarse fácilmente a Independent, pero no ocurre lo mismo al revés, ya que el mallado desaparecerá así como las particiones y la topología virtual.

Herramienta Position Constraints:

La herramienta Position Constraints se utiliza para crear relaciones entre las distintas Parts o piezas, generalmente no es posible fijar una posición con un simple Constraints ni posicionarla directamente, es decir, cuando se aplica una posición mediante este método se hace por relación entre parts, una actuará como fija y la otra se moverá respecto esta.

Las posibles posiciones que el módulo assembly permite son:

- **Parallel face (sólo para part en 3D):** Esta opción permite seleccionar una cara de un part instance para hacerla paralela a otra que se considerará fija. Esta opción no especifica la posición exacta de la pieza móvil pero sí permite seleccionar su dirección gracias a la flechas normales de dirección que aparecen una vez se seleccionan las caras.
- **Face to face (sólo para part en 3D):** Similar al parallel face, sin embargo, esta opción define el huelgo entre las caras paralelas en dirección normal a éstas pero como anteriormente, no la posición exacta.
- **Parallel edge:** Permite colocar los bordes o las aristas de un part móvil paralelo a otro fijo. La posición exacta no es posible obtenerla mediante esta opción, ni tampoco la distancia entre las caras paralelas. Hay que destacar que estas líneas deben ser rectas y no sólo se puede aplicar entre dos part, sino que también sirve para posicionar respecto de ejes auxiliares o de coordenadas.



- **Edge to edge:** Coloca 2 bordes o aristas paralelamente pero definiendo la distancia entre ellas
- **Coaxial (sólo para part en 3D):** Como su propio nombre indica, convierte una cara cilíndrica o cónica en coaxial a otra similar del part considerado como fijo.
- **Coincident point:** Hace coincidir dos puntos previamente seleccionados, sin embargo, no permite seleccionar la orientación de la pieza y ésta no es posible cambiarla una vez seleccionada esta opción.
- **Parallel coordinate systems:** Esta opción convierte en paralelo los ejes del un sistema de coordenadas del part móvil con otro del considerado como fijo.

Crear Patrones:

Esta función permite hacer copias de un part instance seleccionado, se encuentra dentro del menú Instante y puede ser:

- **Patrón lineal:** Crea las copias a lo largo de una dirección, pudiendo indicar el número de éstas y la distancia entre ellas, así como cambiar su dirección. Se pueden crear matrices al realizar copias en otra dirección.
- **Patrón Radial:** Crea copias en forma circular especificando el número y el ángulo (se toma como sentido positivo el antihorario).

Herramientas de corte y fundición:

Es posible tanto fundir como cortar instances. Estas operaciones permiten además entre suprimir o mantener la pieza original.

- **CUT:** El corte se realizará en un part instance por otro u otros parts intances que se encuentren tocando o solapando con el primero. Esta técnica es usada para crear moldes a partir de una pieza o viceversa, así como para modelados de estructuras y en medios acústicos.



No se pueden realizar cortes con piezas tipo Shell, para ello primero deben ser convertidas en solid part.

- **MERGE:** Esta opción permite tanto la fusión de la part instance o de su mallado mesh. Se pueden fusionar varias parts instances en una sola incluso si éstas no se tocan o superponen y elegir si eliminar o no las intersecciones iniciales.

Posibles razones para fusionar part instance pueden ser:

- Asignar propiedades idénticas a la parte unida en vez de hacerlo de una en una.
- Al aplicar restricciones a un grupo de piezas en vez de forma individual.
- Al importar un conjunto de muchas piezas el cual sería difícil mallar individualmente.
- Cuando varias piezas se tocan o superponen, el mallado de estas resulta difícil debido a que ABAQUS/CAE impone unas constricciones, mientras que al fusionarlas, el mallado se simplifica y para mantener las piezas tan sólo hay que realizar particiones.

Merge mesh:

Es de suma importancia advertir que no se pueden cortar partes malladas, pero si fusionarlas.

Se pueden mallar tanto Orphan mesh part instances como dependent, independent part instances o una combinación de las tres.

Cuando se elige fusionar la geometría, como se ha dicho, se crea un nuevo part instance y un nuevo part, pero se elimina el mallado, sin embargo al fusionar la malla, se crea un nuevo orphan mesh pat instance y un nuevo orphan mesh part y el original mallado se fusiona en uno solo.

Si se fusionan piezas con SETS, estos se actualizan automáticamente.

Se puede especificar NODE MERGING TOLERANCE, que es la distancia máxima



entre nodos que habrá, donde se creará una malla compatible eliminando los nodos que esten más cerca de esa distancia y reemplazandolos por unos nuevos que se situarán a una distancia media de los eliminados.

Esta opción permite elegir entre combinar los nodos de la siguiente manera:


- **Boundary only:** Fusiona la malla a lo largo de la frontera, lo que evita comprobar los nodos duplicados.
- **All:** Combina todos los nodos de las partes seleccionadas. Permitiendo eliminar los elementos duplicados.
- **None:** Combina los parts instantes en uno solo pero conservando los nodos originales.

3.4. ANÁLISIS

3.4.1. Modulo Step:

El módulo Step es la etapa donde realmente empieza el análisis, anteriormente lo que se ha estado realizando es el diseño de piezas, orientación, asignación de las propiedades de dichas piezas, etc.

Dentro del modelo existen una serie de pasos de análisis, estos pasos permiten conocer los cambios de cargas, condiciones de contorno, interacciones entre partes, adicciones o eliminaciones y cualquier otro tipo de cambio que pueda existir en el modelo durante el estudio como pueden ser el proceso de análisis, los datos de salida o el mallado. Para llevarlo a cabo, ABAQUS/CAE crea el primer step conocido como Initial Step, éste es único para el estudio y no podrá ser renombrado, editado, copiado o borrado. Su función consiste en definir las condiciones de contorno, campos e interacciones iniciales. Tras este Step, van uno o ilimitados Steps que definirán el proceso de análisis, los cuales deben ser coherentes entre sí para que no existan restricciones en la secuencia.

Desde el menú **Step** → **Create** o pulsando sobre  , aparece la ventana Create Step, figura 14, y tras asignarle nombre al step, se debe elegir el tipo de procedimiento entre **General** o **Linear Perturbation**. La gran diferencia entre los dos tipos de procedimientos reside en que el General es un análisis que permite el estudio no lineal y define una secuencia de eventos donde el estado final del modelo en un step marca el estado inicial del mismo en el siguiente step. Mientras que el Linear Perturbation proporciona la respuesta lineal del último General Nonlinear step.

Una vez seleccionado el procedimiento se selecciona el tipo de análisis, en General existen los siguientes: Coupled, Direct cyclic, Dynamic, Geostatic, Heat transfer, Mass diffusion, Soils, Static y Visco. Y en Linear: Buckle, Frequency, Static y Steady-state dynamics.

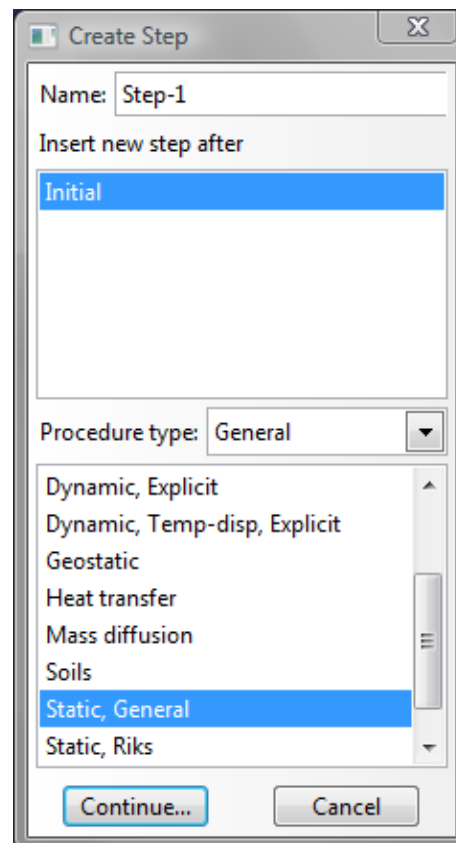


Fig. 14 – Ventana crear Step

A continuación se detallan todos los tipos de análisis que presenta ABAQUS.

Static stress analysis

Se usa para problemas estables, donde los efectos de la inercia son despreciables así como los efectos del material dependientes del tiempo.

Una vez seleccionado este step, se presenta una pantalla con 3 pestañas, Basic, Incrementation y Other.

La configuración de la pestaña **Basic** empieza con **Description**, un pequeño cuadro de texto donde describir el step. Seguido de **Time Period** que nos indica el tiempo. La opción **Nlgeom** permite elegir si la geométrica será lineal durante el estudio (off) o no lineal (On).

El desplegable **Automatic Stabilization**, se activa cuando se esperan problemas relacionados con el padeo, arrugas en la superficie o inestabilidad del material, por lo que



se aplicará un coeficiente de amortiguación a cada step ya que no se traslada de uno a otro.

Dentro del desplegable se encuentran las siguientes opciones:

- **Specify dissipated energy fraction:** Esta opción asume que el problema es estable al inicio y que las inestabilidades se pueden ir desarrollando en el step, por ello, se introduce un valor de amortiguación basado en una fracción de energía de deformación disipada.
- **Specify damping factor:** También puede especificar el factor de amortiguación directamente. Desafortunadamente, por lo general es bastante difícil hacer una estimación razonable para el factor de amortiguación a menos que el valor se conozca a partir de valores de salida anteriores.
- **Use damping factors from previous general step:** Para obtener el factor de amortiguación de la etapa actual a partir del último de la etapa previa. Hay que tener en cuenta que este método anulará los factores de amortiguación que se asignen directamente y si no se puede asociar un factor desde la etapa anterior, Abaqus usará adaptive stabilization para determinarlo.

Activar **Include adiabatic heating effects** si se va a realizar un estudio de tensión en un sistema adiabático.

La pestaña **Incrementation** comienza pidiendo el tipo de incrementación:

Elegir **Automatic** si se desea que Abaqus/Standar determine el incremento adecuándolo al tamaño de tiempo.

Elegir **Fixed** y el usuario especifica el tamaño directo del incremento, entonces Abaqus/standar usará un tamaño mínimo de la constante.

Maximum Number of Increments permite fijar el máximo número de incrementos, el análisis se detendrá si este máximo se sobrepasa aunque no llegue a la solución.

El siguiente paso, Increment size, será útil solamente si se elige un incremento automático. Initial, Minimum y maximum, configuran el valor inicial, mínimo y máximo



del incremento de tiempo permitido por cada paso, aunque Abaqus/Standar puede comenzar y disminuir éste si lo cree necesario para el estudio.

En la pestaña **Other** encontramos los siguientes apartados:

1. **Equation solver Method** permite elegir el método de cálculo y la matriz de almacenamiento.

Method puede ser Direct, elección del método directo por defecto, o Iterative, método de resolución iterativo lineal.

Matrix storage:

- **Use solver default:** Abaqus elige si el esquema de almacenamiento y de solución es simétrico o asimétrico.
 - **Unsymmetric:** Restringe este esquema a asimétrico.
 - **Symmetric:** Restringe este esquema a simétrico.
2. **Solution technique:** Esta opción permite elegir una técnica para la resolución de las ecuaciones.

- **Full Newton:** Usa el método de Newton para resolver ecuaciones de equilibrio no lineales.
- **Quasi-Newton:** Usa este método para resolver ecuaciones de equilibrio no lineales. Esta técnica puede ahorrar coste computacional y es muy exitosa cuando el sistema es muy grande y la matriz de rigidez no cambia entre iteraciones. Sólo en sistemas simétricos.

Al usar este método, se deben de introducir el número máximo de iteraciones permitidas antes de que la matriz nucleo se reforme, por defecto 8 y máximo 25.

- **Contact iterations:** Usa las interacciones de contacto en lugar de las discontinuidades severas o regulares para acelerar los cálculos. Es eficaz para la solución de los grandes problemas, geoméricamente lineales, de pequeño deslizamiento, sin fricción estática con muchas iteraciones de grandes



discontinuidades.

- **Adjustment factor for the number of solutions in any iteration:** Valor de iteraciones antes de que la matriz global factorice.
 - **Maximum number of contact iterations:** El valor máximo de iteraciones de contacto antes de que la nueva matriz global se ensamble y factorice.
3. **Convert severe discontinuity iterations:** Pestaña desplegable que permite tratar las discontinuidades graves de las iteraciones durante un análisis no lineal.
- **Off:** Esta opción sirve para forzar una nueva iteración si la discontinuidad es grande con independencia de la magnitud de los errores de penetración y fuerza. Además, cambia algunos parámetros del tiempo de iteración y utiliza varios criterios para determinar si se debe hacer otra iteración o un nuevo intento con un tamaño del incremento menor.
 - **On:** Seleccionar para usar criterios de convergencia local y determinar si es necesaria una nueva iteración.
 - **Propagate from previous step:** Es el valor predeterminado y es el valor especificado en el Step anterior.
4. **Default load variation with time:** Permite elegir si la magnitud de las cargas se aplica al inicio del Step y se mantiene constante (Instantaneous) o si se prefiere que la carga varíe de forma lineal desde el valor del Step anterior hasta el designado (Ramp linearly over step).
5. **Extrapolation of previous state at start of each increment** Es usado para determinar la primera suposición del método de extrapolación supuesto. La extrapolación se usa en análisis no lineales en ABAQUS/STANDAR para acelerar la solución.
- **Linear:** Indica que la extrapolación debe ser lineal al 100%, en el tiempo, de la solución de incrementos anterior para comenzar la solución de la ecuación no lineal actual.
 - **Parabolic:** Indica que la extrapolación debe ser cuadrática, en el tiempo, de las dos soluciones incrementales anteriores para la solución de la ecuación no lineal



- **None:** Para eliminar cualquier extrapolación.
- 6. **Stop when region “ ” is fully plastic:** Esta opción se selecciona cuando se desea que una región (la cual se nombrará en el espacio designado) sea analizada por la teoría de deformación plástica. Este estudio acabará cuando todos los puntos del cálculo sean completamente plásticos. Sin embargo, el estudio del Step puede acabar si el máximo número de incrementos especificados ha sido excedido.
- 7. **Accept solution after reaching maximum number of iterations:** Esta opción sólo se puede activar si se eligió en Incrementation un tipo de incremento fijo. Lo que se hace, es obligar a aceptar la solución justo un incremento después del máximo número de incrementos, incluso si las tolerancias de equilibrio no son satisfactorias.

Para usar esta opción es necesario un mínimo de dos iteraciones con incrementos muy pequeños y solamente se usa cuando se conoce o tiene la certeza de conocerse el resultado.
- 8. **Obtain long-term solution with time-domain material properties:** Permite obtener la salida de propiedades elásticas en elementos viscoelásticos.

Coupled temp-displacement

Es usado cuando el análisis de tensiones depende de la distribución de temperaturas y viceversa.

Una vez seleccionado, aparecerán tres pestañas, Basic, Incrementation y Other:

En Basic, tras describir si se desea el análisis, se debe elegir entre una respuesta transitoria o de estado de equilibrio. En Time period se introduce el tiempo del Step.

La opción **Nlgeom** permite incluir la no linealidad (On) en grandes desplazamientos o que sólo se permitan los efectos geoméricamente lineales.

El desplegable **Automatic Stabilization**, se activa cuando se esperan problemas relacionados con el padeo, arrugas en la superficie o inestabilidad del material; por lo que se aplicará un coeficiente de amortiguamiento a cada Step.

1. **Specify dissipated energy fraction:** Esta opción asume que el problema es estable



al inicio y que las inestabilidades se pueden ir desarrollando en el step, por ello, se introduce un valor de amortiguación basado en una fracción de energía de deformación disipada.

2. **Specify damping factor** También puede especificar el factor de amortiguamiento directamente. Desafortunadamente, por lo general es bastante difícil hacer una estimación razonable para el factor de amortiguamiento a menos que un valor se conoce a partir de la salida de ejecuciones anteriores; el factor de amortiguamiento incluye información no sólo sobre la cantidad de amortiguación, pero también se trata de tamaño de malla y el comportamiento del material.
3. **Use damping factors from previous general step** para obtener el factor de amortiguación de la etapa actual a partir del último de la etapa previa. Hay que tener en cuenta que este método anulará los factores de amortiguación que se asignen directamente y si no se puede asociar un factor desde la etapa anterior, Abaqus usará adaptive stabilization para determinarlo.
4. **Use adaptive stabilization with max. ratio of stabilization to strain energy**

Activar **Include creep/swelling/viscoelastic behavior** si se desea obtener fluencia o viscoelasticidad de los materiales que así se definieron.

La pestaña **Incrementation**:

1. **Type**: Permite elegir el tipo de incrementación entre un valor que ABAQUS/STANDAR determinará según el tamaño del incremento de tiempo (Automatic) o indicando un tamaño de incrementa fijo señalado por el usuario (Fixed).
2. **Maximum Number of Increments** permite fijar el máximo número de incrementos, el análisis se detendrá si este máximo se sobrepasa aunque no llegue a la solución.
3. El siguiente paso, **Increment size**, será útil solamente si se elige un incremento automático. Initial, Minimum y maximum, configuran el valor inicial, mínimo y máximo del incremento de tiempo permitido por cada paso, aunque Abaqus/Standar



puede comenzar y disminuir éste si lo creer necesario para el estudio.

4. Si se selecciona Automatic y en la pestaña Basic se elige una respuesta transitoria
 - **Max. allowable temperature change per increment:** El usuario introduce un valor máximo de temperatura para el cambio de incremento, retringiendo así el paso del tiempo con lo cual se inpede que este valor se supere en cualquier nodo.
 - **Creep/swelling/viscoelastic strain error tolerance** se activará si fue seleccionado Include creep/swelling/viscoelastic behavior en la pestaña Basic e introduce la máxima diferencia entre las velocidades de deformación a fluencia de inicio y fin en el incremento de deformación a fluencia. Es decir, este valor controla la precisión de la integración a fluencia.
5. Si se eligió Include creep/swelling/viscoelastic behavior en la pestaña Basic se debe elegir una opción en **Creep/swelling/viscoelastic integration:**
 - Explicit/Implicit: Si se desea usar una integración implícita.
 - Explicit: Si se desea únicamente una integración explícita. Esta opción simplifica el coste computacional y la implementación de las leyes de fluencia introducidos por el usuario.

La pestaña **Other:**

1. La primera opción sirve para obtener la matriz de solución:
 - **Use solver default** permite al propio programa elegir entre una matriz simétrica o asimétrica y el esquema de solución necesario.
 - **Unsymmetric** restringe la matriz de almacenamiento a una asimétrica y también el esquema de solución (esta es la única opción permitida si la técnica de solución es Full Newton)
 - **Symmetric** restringe el almacenamiento y el esquema de solución a un problema simétrico.
2. **Solution Technique:** Para elegir la técnica de solución.
 - **Full Newton** utiliza el método de Newton como técnica numérica para resolver



las ecuaciones de equilibrio no lineales.

- **Separated** especifica que las ecuaciones lineales de los campos individuales del proceso fully coupled (), deben ser desacoplados y resueltos individualmente para dichos campos.
 - **Contact Iterations** usa esta técnica en lugar de la de discontinuidades graves para acelerar el proceso. Este método es efectivo para problemas grandes, geoméricamente lineales, con pequeño desplazamiento, sin fricción estática y con grandes discontinuidades en las iteraciones.
 - Adjustment factor for the number of solutions in any iteration es un factor de corrección para el máximo valor de soluciones acertadas.
 - Maximum number of contact iterations: El valor máximo de iteraciones permitidas de iteraciones de contacto antes de que la nueva matriz se ensamble y factorice.
3. El siguiente desplegable Convert severe discontinuity iterations permite elegir una opción para tratar las discontinuidades de las iteraciones en el análisis no linear.
- Off. Fuerza una nueva iteración si se producen graves discontinuidades en ella independientemente del error de magnitud en penetración o fuerza. Esta opción cambia parámetros en el tiempo de incremento y usa diferentes criterios para determinar cuando hacer una nueva iteración o un nuevo intento con un incremento menor.
 - On. Usa criterios de convergencia local para determinar si es necesaria una iteración nueva. El programa determina la máxima penetración y estima el error en la fuerza asociada a las grandes discontinuidades y chequea si son tolerables o no.
 - Propagate from previous step. Selecciona el valor especificado en el Step general anterior.
4. **Default load variation with time:** La variación de carga con respecto al tiempo viene dada de forma automática y corresponde con la opción Respose de la pestaña Basic.
5. **Extrapolation of previous state at start of each increment** sirve para



seleccionar el método de determinar la primera aproximación en la solución incremental.

- **Linear:** El proceso es monotónico y la extrapolación es 100% lineal, en el tiempo.
- **Parabolic:** Para indicar que el proceso debe utilizar una extrapolación cuadrática, en el tiempo, de las dos soluciones incrementales anteriores para comenzar la solución de la ecuación no lineal para el incremento actual.
- **None:** Suprime cualquier extrapolación.

Coupled Thermal-electric

El efecto Joule se produce cuando la corriente eléctrica que fluye a través de un conductor se disipa en forma de calor. Abaqus/Standard proporciona un análisis térmico-eléctrico totalmente acoplado o unido donde las ecuaciones térmicas y eléctricas se resuelven simultáneamente tanto para temperatura y potencial eléctrico en los nodos.

Pestaña Basic:

1. **Description** permite dar una breve descripción del trabajo a realizar.
2. **Response:** Permite la opción de elegir la respuesta entre un estado estacionario o transitorio.
 - **Steady-State:** Al elegir el estado estacionario, se omite el calor interno en las ecuaciones de transferencia de calor. Sólo se considera la corriente continua en el problema y se desprecia su capacitancia.
 - **Transient:** Este método realiza el estudio a través de las ecuaciones de Euler usadas para la transferencia de calor en problemas no acoplados. Método totalmente fiable para problemas lineales.

El programa avisará sobre el tipo de carga que impone en la pestaña Other, debido a la respuesta dada.



3. **Time Period:** Introducir el tiempo que durará el Step.

Pestaña Incrementation:

1. **Type:** Permite elegir el tamaño del tiempo de incremento.
 - Automatic: Abaqus/Standar elegirá el incremento de tiempo más adecuado.
 - Fixed: El usuario elige el tamaño del incremento de tiempo.
2. **Maximum numbers of increments** permite fijar el máximo número de incrementos, el análisis se detendrá si este máximo se sobrepasa aunque no llegue a la solución.
3. **Increment size**, será útil solamente si se elige un incremento automático. Initial, Minimum y Maximum, configuran el valor inicial, mínimo y máximo del incremento de tiempo permitido por cada paso, aunque Abaqus/Standar puede comenzar y disminuir éste si lo considera necesario para el estudio.
4. Las siguientes opciones sólo estarán activas si se eligió una respuesta transitoria en la pestaña Basic:
 - **End step when temperature change is less than:** Es activada si se desea que se finalice el step cuando la variación de temperatura en todos los grados de libertad sea inferior al valor que se introduzca a continuación.
 - Si además se optó por un incremento automático:
 - **Max. allowable temperature change per increment:** Abaqus/Standar restringe el tiempo para que el cambio de temperatura máximo permitido no se supere durante cualquier incremento de tiempo (salvo en los nodos con condiciones de frontera).
 - **Max. allowable emissivity change per increment:** Es usado cuando se realiza un estudio de “radiación en cavidades”, se puede introducir un valor o aceptar el por defecto y si este valor es superado, Abaqus/Standar recorta el incremento hasta el máximo cambio en la emisividad es menor que el valor especificado.



La Pestaña **Other:**

1. La primera opción sirve para obtener la matriz de solución:
 - **Use solver default** permite al propio programa elegir entre una matriz simétrica o asimétrica y el esquema de solución necesario.
 - **Unsymmetric** restringe la matriz de almacenamiento a una asimétrica y también el esquema de solución (esta es la única opción permitida si la técnica de solución es Full Newton)
 - **Symmetric** restringe el almacenamiento y el esquema de solución a un problema simétrico.
2. **Solution Technique:** Para elegir la técnica de solución.
 - **Full Newton** utiliza el método de Newton como técnica numérica para resolver las ecuaciones de equilibrio no lineales.
 - **Separated** especifica que las ecuaciones lineales de los campos individuales del proceso fully coupled, deben ser desacoplados y resueltos individualmente para dichos campos.
3. El siguiente desplegable **Convert severe discontinuity iterations** permite elegir una opción para tratar las discontinuidades de las iteraciones en el análisis no linear.
 - **Off:** Fuerza una nueva iteración si se producen graves discontinuidades en ella independientemente del error de magnitud en penetración o fuerza. Esta opción cambia parámetros en el tiempo de incremento y usa diferentes criterios para determinar cuando hacer una nueva iteración o un nuevo intento con un incremento menor.
 - **On:** Usa criterios de convergencia local para determinar si es necesaria una iteración nueva. El programa determina la máxima penetración y estima el error en la fuerza asociada a las grandes discontinuidades y chequea si son tolerables o no.
 - **Propagate from previous step:** Selecciona el valor especificado en el Step

general anterior.

4. **Default load variation with time:** La variación de carga con respecto al tiempo viene dada de forma automática y corresponde con la opción Respose de la pestaña Basic.
5. **Extrapolation of previous state at start of each increment** sirve para seleccionar el método de determinar la primera aproximación en la solución incremental.
 - Linear: El proceso es monotónico y la extrapolación es 100% lineal, en el tiempo.
 - Parabolic: Para indicar que el proceso debe utilizar una extrapolación cuadrática, en el tiempo, de las dos soluciones incrementales anteriores para comenzar la solución de la ecuación no lineal para el incremento actual.
 - None: Suprime cualquier extrapolación.

Direct Cycling

Este proceso es un análisis Cuasi-estacionario que usa una combianción de las series de Fourier con la interacción en el tiempo de las propiedades del material no lineal para obtener la respuesta cíclica estabilizada de una estructura iterativa evitando el exceso de cálculo asociado a análisis transitorios. La base de este método es la construcción de una función de despazamiento que describe la respuesta de la estructura en todos los tiempos t mientras se le aplica una carga cíclica con periodo T .

Debe tenerse claro que Abaqus/Standar asume geometría lineal en sus propiedades.

Pestaña **Basic**:

1. **Description** permite dar una breve descripción del trabajo a realizar.
2. **Cycle time period:** Permite al usuario introducir el tiempo de un ciclo de carga.
3. **Use displacement Fourier coefficients from previous direct cyclic step:** Indica que este Step es la continuación de otro direct cyclic (estudio ciclico).

Pestaña **Incrementation**:

1. **Type:** Permite elegir el tamaño del tiempo de incremento.
 - Automatic: Abaqus/Standar elegirá el incremento de tiempo más adecuado.
 - Fixed: El usuario elige el tamaño del incremento de tiempo.
2. **Maximum numbers of increments:** Permite fijar el máximo número de incrementos, el análisis se detendrá si este máximo se sobrepasa aunque no llegue a la solución.
3. **Increment size:** Será útil solamente si se elige un incremento automático. Initial, Minimum y maximum, configuran el valor inicial, mínimo y máximo del incremento de tiempo permitido por cada paso, aunque Abaqus/Standar puede comenzar y disminuir éste si lo cree necesario para el estudio.
4. **Maximum numbers of interactions:** Permite al usuario introducir el máximo número de iteraciones por ciclo.
5. **Number of Fourier terms:** El número de términos favorece la precisión del resultado pero con un mayor coste en tiempo y espacio, así mismo, dependerá de la variación de la carga y de la respuesta estructural del material.

Initial, Maximum e Increment permite al usuario introducir el valor de inicio, el máximo valor y el número de incrementos a realizar en la serie de Fourier.
6. **Max. allowable temperature change per increment :** Opción a activar si se eligió un incremento automático. Permite introducir el valor máximo de cambio de temperatura en un incremento, restringiendo si fuese necesario el incremento de tiempo para que no exceda este valor.
7. **Creep/swelling/viscoelastic strain error tolerance :** Opción a activar si se eligió un incremento automático. Permite introducir la máxima diferencia entre las velocidades de deformación a fluencia de inicio y fin en el incremento de deformación a fluencia. Este valor controla la precisión de la integración a fluencia.
8. **Evaluate structure response at time points :** Permite si se selecciona evaluar la respuesta en un momento específico. Este momento puede ser seleccionado desde

el desplegable o creado en el momento.

Pestaña **Fatigue**:

1. **Include low-cycle fatigue analysis:** Al activar la pestaña se llevara a cabo una técnica de modelado para obtener la respuesta estabilizada de una estructura sometida a carga periódica, incluir varios ciclos en un único análisis.

Al incluir la opción anterior, se activan las opciones de **Forward Damage Extrapolation**

2. **Cycle increment Size:** Permite al usuario introducir el valor mínimo y máximo de ciclos durante el cual el daño se extrapola hacia delante en el cálculo. Valores mayores de 0.
3. **Maximum number of cycles** permite elegir entre la opción **Default**, 1,5 el máximo incremento en ciclos sobre el que se extrapola el daño, y **Value**, que permite al usuario introducir un valor.
4. **Damage extrapolation tolerance:** El máximo incremento daño es extrapolado quedará limitado por el valor de la tolerancia aquí introducida, por error 1.

Pestaña **Other**:

1. La primera opción sirve para obtener la matriz de solución:
 - **Use solver default** permite al propio programa elegir entre una matriz simétrica o asimétrica y el esquema de solución necesario.
 - **Unsymmetric** restringe la matriz de almacenamiento a una asimétrica y también el esquema de solución (esta es la única opción permitida si la técnica de solución es Full Newton)
 - **Symmetric** restringe el almacenamiento y el esquema de solución a un problema simétrico.
2. El siguiente desplegable Convert severe discontinuity iterations permite elegir una



opción para tratar las discontinuidades de las iteraciones en el análisis no lineal.

- **Off:** Fuerza una nueva iteración si se producen graves discontinuidades en ella independientemente del error de magnitud en penetración o fuerza. Esta opción cambia parámetros en el tiempo de incremento y usa diferentes criterios para determinar cuando hacer una nueva iteración o un nuevo intento con un incremento menor.
 - **On:** Usa criterios de convergencia local para determinar si es necesaria una iteración nueva. El programa determina la máxima penetración y estima el error en la fuerza asociada a las grandes discontinuidades y chequea si son tolerables o no.
 - **Propagate from previous step:** Selecciona el valor especificado en el Step general anterior.
3. **Extrapolation of previous state at start of each increment** sirve para seleccionar el método de determinar la primera aproximación en la solución incremental.
- **Linear:** El proceso es monotónico y la extrapolación es 100% lineal, en el tiempo.
 - **Parabolic:** Para indicar que el proceso debe utilizar una extrapolación cuadrática, en el tiempo, de las dos soluciones incrementales anteriores para comenzar la solución de la ecuación no lineal para el incremento actual.
 - **None:** Suprime cualquier extrapolación.

Dynamic, Implicit

Los análisis dinámicos lineales y no lineales en Abaqus/Standard, usan un tiempo de integración implícito para calcular la respuesta dinámica transitoria.

Este método de la integración directa prevista en Abaqus/Standard es llamado el operador Hilber-Hughes-Taylor y es una extensión de la regla trapezoidal. El operador Hilber-Hughes-Taylor es implícito: la matriz operadora de integración debe ser invertida, y un conjunto de ecuaciones de equilibrio dinámicas no lineales simultáneas deben



resolverse en cada incremento de tiempo. Esta solución se realiza de forma iterativa usando el método de Newton.

Este proceso de resolución de la ecuación no lineal es caro; y si las ecuaciones no lineales son muy complejas, puede ser difícil obtener una solución. Sin embargo, las no linealidades son generalmente más sencillas de obtener en situaciones dinámicas que en situaciones estáticas porque los términos de inercia proporcionan estabilidad matemática al sistema; por lo tanto, el método tiene éxito excepto en los casos más extremos.

La pestaña Basic empieza con Description, un pequeño cuadro de texto donde describir el step. Seguido de Time Period que permite el tiempo de duración del análisis.

La opción Nlgeom nos permite elegir si la geométrica será lineal durante el estudio (off) o no lineal (On).

Activar Include adiabatic heating effects si se va a realizar un estudio de tensión en un sistema adiabático.

La pestaña **Increment:**

1. **Type:** Permite elegir el tamaño del tiempo de incremento.
 - Automatic: Abaqus/Standar elegirá el incremento de tiempo más adecuado
 - Fixed: El usuario elige el tamaño del incremento de tiempo
2. **Maximum numbers of increments** permite fijar el máximo número de incrementos, el análisis se detendrá si este máximo se sobrepasa aunque no llegue a la solución.
3. **Increment size**, será útil solamente si se elige un incremento automático. Initial, Minimum y maximum, configuran el valor inicial, mínimo y máximo del incremento de tiempo permitido por cada paso, aunque Abaqus/Standar puede comenzar y disminuir éste si lo cree necesario para el estudio.
4. **Half-increment residual tolerance** permite introducir un error residual de equilibrio entre incrementos de tiempo. Este valor es la base del sistema de adaptación del tiempo de incrementación, si el valor es pequeño indica que la



exactitud es alta y por lo tanto el paso de tiempo puede aumentar de forma segura, a la inversa indica que el valor de tiempo debe reducirse.

5. **Suppress half-increment residual calculation** : se activa si se decidió usar un tipo de incremento fijo y si se desea reducir el coste computacional.

La pestaña **Other**:

1. La primera opción sirve para obtener la matriz de solución:
 - **Use solver default** permite al propio programa elegir entre una matriz simétrica o asimétrica y el esquema de solución necesario.
 - **Unsymmetric** restringe la matriz de almacenamiento a una asimétrica y también el esquema de solución (esta es la única opción permitida si la técnica de solución es Full Newton)
 - **Symmetric** restringe el almacenamiento y el esquema de solución a un problema simétrico.
2. **Solution technique**: Esta opción permite elegir una técnica para la resolución de las ecuaciones.
 - **Full Newton**: Usa el método de Newton para resolver ecuaciones de equilibrio no lineales.
 - **Quasi-Newton**: Usa este método para resolver ecuaciones de equilibrio no lineales. Esta técnica puede ahorrar coste computacional y es muy exitosa cuando el sistema es muy grande y la matriz de rigidez no cambia entre iteraciones. Sólo en sistemas simétricos.

Al usar este método, se deben de introducir el número máximo de iteraciones permitidas antes de que la matriz nucleo se reforme, por defecto 8 y máximo 25.

3. El siguiente desplegable **Convert severe discontinuity iterations** permite elegir una opción para tratar las discontinuidades de las iteraciones en el análisis no lineal.
 - **Off**. Fuerza una nueva iteración si se producen graves discontinuidades en ella independientemente del error de magnitud en penetración o fuerza. Esta opción

cambia parámetros en el tiempo de incremento y usa diferentes criterios para determinar cuando hacer una nueva iteración o un nuevo intento con un incremento menor.

- **On.** Usa criterios de convergencia local para determinar si es necesaria una iteración nueva. El programa determina la máxima penetración y estima el error en la fuerza asociada a las grandes discontinuidades y chequea si son tolerables o no.
- **Propagate from previous step.** Selecciona el valor especificado en el Step general anterior.

4. **Default load variation with time :**

- **Instantaneous** se utiliza para aplicar la carga de forma instantánea al comenzar el Step y dejarla constante durante todo el estudio.
- **Ramp linearly over Step** permite que la magnitud de la carga se desarrolle linealmente desde el valor del anterior Step hasta el valor total.

5. **Extrapolation of previous state at start of each increment** sirve para seleccionar el método de determinar la primera aproximación en la solución incremental.

- **Linear:** El proceso es monotónico y la extrapolación es 100% lineal, en el tiempo.
- **Parabolic:** Para indicar que el proceso debe utilizar una extrapolación cuadrática, en el tiempo, de las dos soluciones incrementales anteriores para comenzar la solución de la ecuación no lineal para el incremento actual.
- **None:** Suprime cualquier extrapolación.

6. **Numerical damping control parameter** introduce un parámetro de control de amortiguación artificial (creado por el operador implícito), los valores van de 0 (sin amortiguación) a -0.333 (máxima amortiguación), el valor por defecto es 0,05.

7. **Bypass calculations of initial accelerations at the beginning of step** es apropiado solamente si la carga no varía de forma brusca al inicio, entonces, se puede activar si se desea dar uno de los dos enfoques siguientes; el Step es el primero dinámico y se asume que las aceleraciones iniciales son cero, o bien si el Step anterior fue



también dinámico, por lo cual se asuman como aceleraciones iniciales, las finales del anterior Step. Aunque por error, Abaqus/Standar calcula las aceleraciones al inicio de dicho estudio.

8. **Accept solution after reaching maximum number of iterations** solo se podrá usar con una incrementación fija y obliga al programa a aceptar la solución del siguiente incremento tras superarse el máximo número de iteraciones permitidas incluso si el equilibrio de tolerancias no es satisfactorio. Para poder usar esta opción el mínimo de iteraciones debe ser 2 y los incrementos muy pequeños.

Dynamic, Explicit

El análisis dinámico explícito es computacionalmente eficiente para el análisis de grandes modelos dinámicos con tiempos de respuesta relativamente cortos y para el análisis de los eventos o procesos extremadamente discontinuos, permite definir muchas condiciones de contorno generales, usa una teoría de deformación muy consistente (los modelos pueden sufrir grandes rotaciones y deformidades), puede usar una teoría de deformación geoméricamente lineal (tensiones y rotaciones se asumen como pequeñas), se puede utilizar para realizar un análisis de tensión adiabático si se espera que la disipación inelástica genere calor en el material, se puede utilizar para llevar a cabo los análisis cuasi-estático con condiciones de contacto complicados y permite el uso de incremento de tiempo automático o fijo, por defecto, Abaqus/Explicit utiliza incrementación de tiempo automático.

La pestaña **Basic** empieza con **Description**, un pequeño cuadro de texto donde describir el step. Seguido de **Time Period** que permite el tiempo de duración del análisis.

La opción **Nlgeom** nos permite elegir si la geométrica será lineal durante el estudio (off) o no lineal (On).

Activar **Include adiabatic heating effects** si se va a realizar un estudio de tensión en un sistema adiabático.

La pestaña **Increment**:

1. **Type:** Permite elegir el tamaño del tiempo de incremento.

- **Automatic:** Abaqus/Standar elegirá el incremento de tiempo más adecuado
- **Fixed:** El usuario elige el tamaño del incremento de tiempo

Dependiendo del tipo de incremento aceptado, Abaqus exhibe una serie de opciones a realizar:

2. Si se elige Automatic:

- **Stable increment estimator:** El incremento automático en Abaqus/Explicit, no requiere de la intervención del usuario, sin embargo, existen dos métodos para ajustar el tiempo de incrementación y evitar
 - **Global:** Permite a un estimador global determinar el límite de estabilidad como el del Step precedente. El algoritmo determina la frecuencia máxima de todo el modelo utilizando la velocidad de la onda de dilatación actual. Este algoritmo actualiza continuamente la estimación de la frecuencia máxima y permite incrementos de tiempo que exceden a los del metodo Element-by-element, sin embargo, si el coste computacional es muy elevado respecto a los beneficios, Abaqus/Explicit cambia inmediatamente a Elemen-by-element.
 - **Element-by-element:** Este algoritmo determina la estimación a partir de la velocidad de la onda de dilatación corriente en dicho elemento. Este método es conservador dará un incremento de tiempo estable menor que el límite de estabilidad real.
- **Max. Time increment:** Permite elegir entre Unlimited, si no se desea un limite superior al tiempo de incrementación, o Value, que permite imponer tal límite y escribirlo.
- **Time scaling factor:** Si se desea, permite ajustar el incremento de tiempo estable a computerizar con el programa.

3. Si se elige Fixed la opción para determinar el tamaño del incremento se reduce a las



siguientes opciones:

- **User-defined time increment** para introducir directamente el tamaño del incremento y además escribir su valor.
 - **Use element-by-element time increment estimator** para determinar el incremento de tiempo a partir del tamaño el límite inicial de estabilidad elemento-a-elemento durante todo el step. La velocidad de la onda de dilatación en cada elemento en el comienzo de la etapa se utiliza para calcular el tamaño fijo del incremento de tiempo.
4. **Time Scaling Factor:** Permite introducir un valor y así estabilizar el incremento de tiempo durante la computerización.

La pestaña **Mass Scaling**:

Mass Scaling es usado a menudo por Abaqus/Explicit para aumentar la eficiencia computacional en análisis tipo quasic-static y algunos dinámicos que contengan elementos muy pequeños lo que lleva a que éstos controlen el incremento de tiempo. Esto es usado normalmente para escalar la masa de todo el modelo o escalar las masas de elementos individuales y/o conjuntos de elementos; escalar la masa en una base por paso en un análisis de varios pasos, y la escala de la masa al comienzo de la etapa y/o en todo el paso.

1. **Use scaled mass and “throughout step” definitions from the previous step** permite elegir que el escalonado de masa se propague desde el Step anterior.
2. **Use scaling definitions below** permite crear una o más definiciones de la escala de masas.

Clickar en Create y aparecerá la ventana Edit mass scaling:

- **Objective** permite definir el tipo de mass scaling:
 - **Semi-automatic mass scaling** lo define para cualquier tipo de análisis excepto el bulk metal rolling
 - **Automatic mass scaling** define el analisis del bulk metal rolling.
 - **Reinitialize mass** reinicia la masa a escala al valor original, evitando que



un escalado anterior sea usado en este análisis.

- **Disable mass scaling throughout step** desactiva todas las variables de escalado de anteriores Step.
- Application define la región y el modo de escalar.
 - Region permite elegir entre Whole model, toda la pieza, o set, si se ha creado con anterioridad.
 - Scale, sólo permitido en dos objetivos, indica cómo desea escalar las masas de los elementos.
 - **At beginning of step** la escalada de la masa de los elementos se fija al principio del step
 - **Throughout step**: la escalada de la masa es periódica durante el step.
- 3. Type define la escala de las masas dependiendo del tipo de objetivo seleccionado.
- Al activar **Semi-automatic mass scaling** puede elegir activar dos opciones dependiendo de la escala aplicada en Application
 - **Scale by factor** introduce el usuario el valor de inicio para el trabajo actual.
 - **Scale to target time increment of** introduce el usuario un valor estable para el incremento del tiempo. Acto seguido, del desplegable Scale element mass escoger una de las tres opciones para que el programa lo aplique.
 - **Uniformly to satisfy target** escala las masas de tal forma que el valor más pequeño sea el introducido anteriormente.
 - **If below minimum target** escala las masas de los elementos cuyo incremento de tiempo es inferior al introducido.
 - **Nonuniformly to equal target** escala las masas para que todos los elementos tengan el incremento de tiempo anterior.
- Al activar Automatic mass scaling se puede elegir una de las 3 opciones siguientes:
 - Feed rate: Introducir la velocidad media estimada de la pieza en la dirección de las condiciones de estado.



- Extruded element length: Introducir la longitud media del elemento en la dirección de laminación.
 - Nodes in cross-section: Introducir el número de nodos en la sección transversal de la pieza. Al aumentar este valor disminuye el mass scaling.
4. Frequency: Especifica cuando, durante el step, se desea activar los cálculos de escalado.
- Scale Every “ ” Increments: Especifica la frecuencia en intervalos.
 - Scale At “ ” equals intervals: Especifica el número de intervalos que se realizará dicho cálculo.

Esta opción sólo será ejecutable en los objetivos automáticos y semiautomáticos cuando se seleccione la opción Throughout de scale en application.

La Pestaña **Other**:

1. **Linear bulk viscosity parameter:** Permite introducir un valor, aunque ya aparece por defecto uno, como viscosidad lineal. Este parámetro es incluido en los cálculos de Abaqus/Explicit por defecto.
2. **Quadratic bulk viscosity parameter:** Se aplica sólo si la velocidad de deformación volumétrica es a compresión. Aplicable a la viscosidad de elementos sólidos continuos.

Dynamic Term-disp, Explicit

Permite obtener un análisis completo de temperatura-desplazamiento donde el análisis de stress depende de la distribución de temperaturas y viceversa, obteniendo así simultaneamente las soluciones térmicas y mecánicas. Este análisis incluye inercias y modelos térmicos transitorios.

La pestaña **Basic** empieza con **Description**, un pequeño cuadro de texto donde describir el step. Seguido de **Time Period** que permite el tiempo de duración del análisis.



La opción **Nlgeom** nos permite elegir si la geométrica será lineal durante el estudio (off) o no lineal (On).

Activar **Include adiabatic heating effects** si se va a realizar un estudio de tensión en un sistema adiabático.

La pestaña **Increment**:

1. **Type**: Permite elegir el tamaño del tiempo de incremento.

- Automatic: Abaqus/Standar elegirá el incremento de tiempo más adecuado
- Fixed: El usuario elige el tamaño del incremento de tiempo

Dependiendo del tipo de incremento aceptado, Abaqus exhibe una serie de opciones a realizar:

2. Si se elige Automatic:

1. **Stable increment estimator**: El incremento automático en Abaqus/Explicit, no requiere de la intervención del usuario, sin embargo, existen dos métodos para ajustar el tiempo de incrementación y evitar

- Global: Permite a un estimador global determinar el límite de estabilidad como el del Step precedente. El algoritmo determina la frecuencia máxima de todo el modelo utilizando la velocidad de la onda de dilatación actual. Este algoritmo actualiza continuamente la estimación de la frecuencia máxima y permite incrementos de tiempo que exceden a los del metodo Element-by-element, sin embargo, si el coste computacional es muy elevado respecto a los beneficios, Abaqus/Explicit cambia inmediatamente a Elemen-by-element.
- Element-by-element: Este algoritmo determina la estimación a partir de la velocidad de la onda de dilatación corriente en dicho elemento. Este método es conservador, dará un incremento de tiempo estable menor que el límite de estabilidad real.

2. **Max. Time increment**: Permite elegir entre Unlimited, si no se desea un limite



superior al tiempo de incrementación, o Value, que permite imponer tal límite y escribirlo.

3. **Time scaling factor:** Si se desea, permite ajustar el incremento de tiempo estable a computerizar con el programa.
3. Si se elige Fixed la opción para determinar el tamaño del incremento se reduce a las siguientes opciones:
 - **User-defined time increment** para introducir directamente el tamaño del incremento y además escribir su valor.
 - **Use element-by-element time increment estimator** para determinar el incremento de tiempo a partir del tamaño el límite inicial de estabilidad elemento-a-elemento durante todo el step. La velocidad de la onda de dilatación en cada elemento en el comienzo de la etapa se utiliza para calcular el tamaño fijo del incremento de tiempo.
4. **Time Scaling Factor:** Permite introducir un valor y así estabilizar el incremento de tiempo durante la computerización.

La pestaña **Mass Scaling:**

Mass Scaling es usado a menudo por Abaqus/Explicit para aumentar la eficiencia computacional en análisis tipo quasic-static y algunos dinámicos que contengan elementos muy pequeños lo que lleva a que éstos controlen el incremento de tiempo. Esto es usado normalmente para escalar la masa de todo el modelo o escalar las masas de elementos individuales y/o conjuntos de elementos; escalar la masa en una base por paso en un análisis de varios pasos, y la escala de la masa al comienzo de la etapa y/o en todo el paso.

1. **Use scaled mass and “throughout step” definitions from the previous step** permite elegir que el escalonado de masa se propague desde el Step anterior.
2. **Use scaling definitions below** permite crear una o más definiciones de la escala de masas.

Clickar en Create y aparecerá la ventana Edit mass scaling:

1. **Objective** permite definir el tipo de mass scaling:
 - **Semi-automatic mass scaling** define la escala semiautomática para cualquier tipo de análisis excepto el bulk metal rolling



- **Automatic mass scaling** define el análisis del bulk metal rolling.
 - **Reinitialize mass** reinicia la escala al valor original, evitando que un escalado anterior sea usado en este análisis.
 - **Disable mass scaling throughout step** desactiva todas las variables de escalado de anteriores Step.
2. Application define la región y el modo de escalar.
- Region permite elegir entre Whole model, toda la pieza, o set, si se ha creado con anterioridad.
 - Scale, sólo permitido en dos objetivos, indica cómo desea escalar las masas de los elementos.
 - **At beginning of step** la escalada de la masa de los elementos se fija al principio del step
 - **Throughout step:** la escalada de la masa es periódica durante el step.
3. Type define la escala de las masas dependiendo del tipo de objetivo seleccionado.
- Al activar **Semi-automatic mass scaling** puede elegir activar dos opciones dependiendo de la escala aplicada en Application
 - Scale by factor introduce el usuario el valor de inicio para el trabajo actual.
 - **Scale to target time increment of** introduce el usuario un valor estable para el incremento del tiempo. Acto seguido, del desplegable Scale element mass escoger una de las tres opciones para que el programa lo aplique.
 - **Uniformly to satisfy target** escala las masas de tal forma que el valor más pequeño sea el introducido anteriormente.
 - **If below minimum target** escala las masas de los elementos cuyo incremento de tiempo es inferior al introducido.
 - **Nonuniformly to equal target** escala las masas para que todos los elementos tengan el incremento de tiempo anterior.
 - Al activar Automatic mass scaling se puede elegir una de las 3 opciones siguientes:



- Feed rate: Introducir la velocidad media estimada de la pieza en la dirección de las condiciones de estado.
 - Extruded element length: Introducir la longitud media del elemento en la dirección de laminación.
 - Nodes in cross-section: Introducir el número de nodos en la sección transversal de la pieza. Al aumentar este valor disminuye el mass scaling.
4. Frequency: Especifica cuando, durante el step, se desea activar los cálculos de escalado.
- Scale Every “ ” Increments: Especifica la frecuencia en intervalos
 - Scale At “ ” equals intervals: especifica el número de intervalos que se realizará dicho cálculo

Esta opción sólo será ejecutable en los objetivos automáticos y semiautomáticos cuando se seleccione la opción Throughout de scale en application.

La Pestaña **Other**:

1. **Linear bulk viscosity parameter:** Permite introducir un valor, aunque ya aparece por defecto uno, como viscosidad lineal. Este parámetro es incluido en los cálculos de Abaqus/Explicit por defecto.
2. **Quadratic bulk viscosity parameter:** Se aplica sólo si la velocidad de deformación volumétrica es a compresión. Aplicable a la viscosidad de elementos sólidos continuos.

Geostatic

Permite verificar que el campo de esfuerzos estáticos inicial está en equilibrio con las cargas aplicadas y las condiciones de contorno o iterar para conseguirlo. Este tipo de procedimiento suele ser el primer paso de un análisis geotécnico, seguido de un análisis de difusión de fluidos y tensión o un análisis estático.

La configuración de la pestaña **Basic** empieza con **Description**, un pequeño cuadro de texto donde describir el step.



La opción **Nlgeom** nos permite elegir si la geométrica será lineal durante el estudio (off) o no lineal (On).

La Pestaña **Other**:

1. **Equation solver Method** que permite elegir el método de cálculo y la matriz de almacenamiento:

Method puede ser Direct, elección del método directo por defecto, o Iterative, método de resolución iterativo lineal.

Matrix storage:

Use solver default: Abaqus elige si el esquema de almacenamiento y de solución es simétrico o asimétrico

Unsymmetric: Restringe este esquema a asimétrico.

Symmetric: Restringe este esquema a simétrico.

2. **Solution technique:** Esta opción permite elegir una técnica para la resolución de las ecuaciones.

- **Full Newton:** Usa el método de Newton para resolver ecuaciones de equilibrio no lineales.
- **Quasi-Newton:** Usa este método para resolver ecuaciones de equilibrio no lineales. Esta técnica puede ahorrar coste computacional y es muy exitosa cuando el sistema es muy grande y la matriz de rigidez no cambia entre iteraciones. Sólo en sistemas simétricos.

Al usar este método, se deben de introducir el número máximo de iteraciones permitidas antes de que la matriz nucleo se reforme, por defecto 8 y máximo 25.

- **Contact iterations:** Usa las interacciones de contacto en lugar de las graves y regulares discontinuidades de las mismas para acelerar los cálculos. Es eficaz para la solución de los grandes problemas, geoméricamente lineales, de pequeño deslizamiento, sin fricción estática con muchas iteraciones de grandes discontinuidades.
 - **Adjustment factor for the number of solutions in any iteration**
 - **Maximum number of contact iterations :** El valor máximo de iteraciones de contacto antes de que la nueva matriz global se ensamble

y factorice.

3. **Convert severe discontinuity iterations:** Pestaña desplegable que nos permite tratar las discontinuidades graves de las iteraciones durante un análisis no lineal.
 - Off: Esta opción sirve para forzar una nueva iteración si la discontinuidad es grande con independencia de la magnitud de los errores de penetración y fuerza. Además, cambia algunos parámetros del tiempo de iteración y utiliza varios criterios para determinar si se debe hacer otra iteración o un nuevo intento con un tamaño del incremento menor
 - On: Seleccionar para usar criterios de convergencia local y determinar si es necesaria una nueva iteración
 - Propagate from previous step: Es el valor predeterminado y es el valor especificado en el Step anterior.

Heat transfer

Permite realizar un análisis de transferencia de calor separado de la conductividad para un cuerpo sólido con conducción de calor incluyendo energía interna (efectos de calor latente incluido), condiciones de contorno generales de convección y radiación, radiación en cavidades. La convección forzada de un fluido a través de la malla se puede modelar usando elementos de convección/difusión forzados.

Pestaña Basic:

1. Description permite dar una breve descripción del trabajo a realizar.
2. **Response:** Permite la opción de elegir la respuesta entre un estado estacionario o transitorio.
 - Steady-State: Al elegir el estado estacionario, se omite el calor interno en las ecuaciones de transferencia de calor. Solo se considera la corriente continua en el problema y se desprecia su capacitancia.
 - Transient: Este método realiza el estudio a través de las ecuaciones de Euler usadas para la transferencia de calor en problemas no acoplados. Método totalmente fiable para problemas lineales.



El programa avisará sobre el tipo de carga que impone en la pestaña Other, debido a la respuesta dada.

3. **Time Period:** Introducir el tiempo que durará el Step.

Pestaña Incrementation:

1. **Type:** Permite elegir el tamaño del tiempo de incremento.
 - Automatic: Abaqus/Standar elegirá el incremento de tiempo más adecuado
 - Fixed: El usuario elige el tamaño del incremento de tiempo
2. **Maximum numbers of increments** permite fijar el máximo número de incrementos, el análisis se detendrá si este máximo se sobrepasa aunque no llegue a la solución.
3. **Increment size**, será útil solamente si se elige un incremento automático. Initial, Minimum y maximum, configuran el valor inicial, mínimo y máximo del incremento de tiempo permitido por cada paso, aunque Abaqus/Standar puede comenzar y disminuir éste si lo cree necesario para el estudio.

Las siguientes opciones sólo estarán activas si se eligió una respuesta transitoria en la pestaña Basic:

4. **End step when temperature change is less than** es activada si se desea que se finalice el step cuando la variación de temperatura en todos los grados de libertad sea inferior al valor que se introduzca a continuación.

Si además se optó por un incremento automático:

- **Max. allowable temperature change per increment :** Abaqus/Standar restringe el tiempo para que el cambio de temperatura máximo permitido no se supere durante cualquier incremento de tiempo (salvo en los nodos con condiciones de frontera).
- **Max. allowable emissivity change per increment** es usado cuando se realiza un estudio de “radiación en cavidades”, se puede introducir un valor o aceptar el por defecto y si este valor es superado, Abaqus/Standar recorta el incremento hasta el máximo cambio en la emisividad es menor que el valor especificado.

En la pestaña Other encontramos los siguientes apartados:

1. **Equation solver Method** que permite elegir el método de cálculo y la matriz de almacenamiento:

Method puede ser Direct, elección del método directo por defecto, o Iterative, método de resolución iterativo lineal.

Matrix storage:

- **Use solver default:** Abaqus elige si el esquema de almacenamiento y de solución es simétrico o asimétrico
 - **Unsymmetric:** Restringe este esquema a asimétrico.
 - **Symmetric:** Restringe este esquema a simétrico.
2. **Solution technique:** Esta opción permite elegir una técnica para la resolución de las ecuaciones.

- **Full Newton:** Usa el método de Newton para resolver ecuaciones de equilibrio no lineales.
- **Quasi-Newton:** Usa este método para resolver ecuaciones de equilibrio no lineales. Esta técnica puede ahorrar coste computacional y es muy exitosa cuando el sistema es muy grande y la matriz de rigidez no cambia entre iteraciones. Sólo en sistemas simétricos.

Al usar este método, se deben de introducir el número máximo de iteraciones permitidas antes de que la matriz nucleo se reforme, por defecto 8 y máximo 25.

- **Contact iterations:** Usa las interacciones de contacto en lugar de las graves y regulares discontinuidades de las mismas para acelerar los cálculos. Es eficaz para la solución de los grandes problemas, geoméricamente lineales, de pequeño deslizamiento, sin fricción estática con muchas iteraciones de grandes discontinuidades.
 - **Adjustment factor for the number of solutions in any iteration**
 - **Maximum number of contact iterations :** El valor máximo de iteraciones de contacto antes de que la nueva matriz global se ensamble y factorice.
3. **Convert severe discontinuity iterations:** Pestaña desplegable que nos permite tratar las discontinuidades graves de las iteraciones durante un análisis no lineal.



- Off: Esta opción sirve para forzar una nueva iteración si la discontinuidad es grande con independencia de la magnitud de los errores de penetración y fuerza. Además, cambia algunos parámetros del tiempo de iteración y utiliza varios criterios para determinar si se debe hacer otra iteración o un nuevo intento con un tamaño del incremento menor
 - On: Seleccionar para usar criterios de convergencia local y determinar si es necesaria una nueva iteración
 - Propagate from previous step: Es el valor predeterminado y es el valor especificado en el Step anterior.
2. **Default load variation with time:** Permite elegir si la magnitud de las cargas se aplica al inicio del Step y se mantiene constante (Instantaneous) o si se prefiere que la carga varíe de forma lineal desde el valor del Step anterior hasta el designado (**Ramp linearly over step**).
3. **Extrapolation of previous state at start of each increment** Es usado para determinar la primera suposición del método de extrapolación supuesto. La extrapolación se usa en análisis no lineales en ABAQUS/STANDAR para acelerar la solución.
- Linear: Indica que la extrapolación debe ser lineal al 100%, en el tiempo, de la solución de incrementos anterior para comenzar la solución de la ecuación no lineal actual.
 - Parabolic: Indica que la extrapolación debe ser cuadrática, en el tiempo, de las dos soluciones incrementales anteriores para la solución de la ecuación no lineal actual.
 - None: Para eliminar cualquier extrapolación.

Mass diffusion

Permite el análisis transitorio o en estado estacionario de la difusión de un material a través de otro. Las ecuaciones que rigen la difusión de masa son una extensión de las ecuaciones de Fick las cuales permiten para la solubilidad no uniforme de la sustancia de difusión en el material de base y para la difusión de masa, ser impulsada por gradientes de temperatura y presión.



En Basic, tras describir si se desea el análisis, se debe elegir entre una respuesta transitoria o de estado de equilibrio.

En Time period se introduce el tiempo del Step.

La opción **Nlgeom** no permite elegir si la geométrica será lineal durante el estudio (off) o no lineal (On). Aparecerá en Off.

Pestaña Incrementation:

1. **Type:** Permite elegir el tamaño del tiempo de incremento.
 - Automatic: Abaqus/Standar elegirá el incremento de tiempo más adecuado
 - Fixed: El usuario elige el tamaño del incremento de tiempo.
2. **Maximum numbers of increments** permite fijar el máximo número de incrementos, el análisis se detendrá si este máximo se sobrepasa aunque no llegue a la solución.
3. **Increment size**, será útil solamente si se elige un incremento automático. Initial, Minimum y maximum, configuran el valor inicial, mínimo y máximo del incremento de tiempo permitido por cada paso, aunque Abaqus/Standar puede comenzar y disminuir éste si lo cree necesario para el estudio.

Las siguientes opciones sólo estarán activas si se eligió una respuesta transitoria en la pestaña Basic y un incremento automático:

- **End step when normalized concentration change rate is less than:** Permite introducir una tasa de cambio de concentración, el análisis terminará cuando dichas concentraciones nodales normalizadas sean inferiores a ella.
- **Max. allowable normalized concentration change per increment:** Permite introducir un valor para Abaqus/Standard restringiendo que el paso de tiempo no supere este valor en cualquier nodo (excepto los nodos con condiciones de frontera) durante ningún incremento.

La pestaña Other:

1. La única opción de matriz para resolver las ecuaciones será la asimétrica



2. **Convert severe discontinuity iterations:** Pestaña desplegable que nos permite tratar las discontinuidades graves de las iteraciones durante un análisis no lineal.
 - Off: Esta opción sirve para forzar una nueva iteración si la discontinuidad es grande con independencia de la magnitud de los errores de penetración y fuerza. Además, cambia algunos parámetros del tiempo de iteración y utiliza varios criterios para determinar si se debe hacer otra iteración o un nuevo intento con un tamaño del incremento menor
 - On: Seleccionar para usar criterios de convergencia local y determinar si es necesaria una nueva iteración
 - Propagate from previous step: Es el valor predeterminado y es el valor especificado en el Step anterior.
3. **Default load variation with time:** Permite elegir si la magnitud de las cargas se aplica al inicio del Step y se mantiene constante (Instantaneous) o si se prefiere que la carga varíe de forma lineal desde el valor del Step anterior hasta el designado (**Ramp linearly over step**).
4. **Extrapolation of previous state at start of each increment** Es usado para determinar la primera suposición del método de extrapolación supuesto. La extrapolación se usa en análisis no lineales en ABAQUS/STANDARD para acelerar la solución.
 - Linear: Indica que la extrapolación debe ser lineal al 100%, en el tiempo, de la solución de incrementos anterior para comenzar la solución de la ecuación no lineal actual.
 - Parabolic: Indica que la extrapolación debe ser cuadrática, en el tiempo, de las dos soluciones incrementales anteriores para la solución de la ecuación no lineal actual.
 - None: Para eliminar cualquier extrapolación.

Soils

Este step permite la configuración de un análisis de tensión eficaz para la acumulación de líquido medios porosos. Un análisis de la difusión del fluido de poro / estrés acoplado permite dar forma a una sola fase, el flujo de fluido parcial o totalmente

saturado a través de medios porosos.

La pestaña Basic:

1. **Description** permite dar una breve descripción sobre el trabajo a realizar.
2. **Pore fluid response**
 - Steady-State especifica que no hay efectos transitorios en la ecuación de continuidad del líquido humectante. La solución corresponde a las velocidades constantes del líquido humectante y el volumen constante de líquido humectante por unidad de volumen.
 - Transient consolidation utiliza un operador de diferencia hacia atrás para integrar la ecuación de continuidad. Este operador proporciona estabilidad incondicional para que la única preocupación con respecto a la integración en el tiempo es la exactitud
1. **Time Period:** Introducir el tiempo que durará el Step.
2. La opción **Nlgeom** nos permite elegir si la geométrica será lineal durante el estudio (off) o no lineal (On).
3. **Automatic Stabilization**, se activa cuando se esperan problemas relacionados con el padeo, arrugas en la superficie o inestabilidad del material; por lo que se aplicará un coeficiente de amortiguamiento a cada Step ya que no se traslada.
- **Specify dissipated energy fraction:** Esta opción calcula el factor de amortiguamiento a partir de la fracción de energía disipada introducida por el usuario. Por defecto 0.0002
- **Specify damping factor** permite especificar el factor de amortiguamiento directamente. Desafortunadamente, por lo general es bastante difícil hacer una estimación razonable para el factor de amortiguamiento.
- **Use damping factors from previous general step** para obtener el factor de amortiguación de la etapa actual a partir del último de la etapa previa. Hay que tener en cuenta que este método anulará los factores de amortiguación que se asignen directamente y si no se puede asociar un factor desde la etapa anterior, Abaqus usará adaptive stabilization para determinarlo.



- **Use adaptive stabilization with max. ratio of stabilization to strain energy**
Permite introducir un valor, cuando se use la adaptación de la estabilidad, de precisión de la tolerancia para la energía disipada por la amortiguación.
- 4. Activar **Include creep/swelling/viscoelastic behavior** si se desea obtener la fluencia o la viscoelasticidad de los materiales que así se definieron.

La pestaña Incrementation:

1. **Type:** Permite elegir el tamaño del tiempo de incremento.
 - **Automatic:** Abaqus/Standar elegirá el incremento de tiempo más adecuado
 - **Fixed:** El usuario elige el tamaño del incremento de tiempo.
2. **Maximum numbers of increments** permite fijar el máximo número de incrementos, el análisis se detendrá si este máximo se sobrepasa aunque no llegue a la solución.
3. **Increment size**, será útil solamente si se elige un incremento automático. Initial, Minimum y maximum, configuran el valor inicial, mínimo y máximo del incremento de tiempo permitido por cada paso, aunque Abaqus/Standar puede comenzar y disminuir éste si lo cree necesario para el estudio.
4. **End step when pore pressure change rate is less than** permite introducir un valor mínimo para la tasa de cambio de presión en el poro. El análisis terminará si todas las presiones intersticiales están cambiando a un ritmo que es inferior a la tasa introducida.
5. **Max. pore pressure change per increment** restringe el paso de tiempo para asegurarse de que este valor no se supere en cualquier nodo salvo en los nodos frontera.
6. **Creep/swelling/viscoelastic strain error tolerance to** si en la pestaña Basic se activó Include creep/swelling/viscoelastic behavior, esta opción permite introducir la máxima diferencia en el incremento de deformación calculada a partir de las velocidades de deformación de fluencia al principio y al final del incremento. Este valor controla la exactitud de la integración de fluencia



La pestaña Other:

1. **Equation solver Method** que permite elegir el método de cálculo y la matriz de almacenamiento:

Method puede ser Direct, elección del método directo por defecto, o Iterative, método de resolución iterativo lineal.

Matrix storage:

- **Use solver default:** Abaqus elige si el esquema de almacenamiento y de solución es simétrico o asimétrico.
 - **Unsymmetric:** Restringe este esquema a asimétrico.
 - **Symmetric:** Restringe este esquema a simétrico.
2. **Solution technique:** Esta opción permite elegir una técnica para la resolución de las ecuaciones.
 - **Full Newton:** Usa el método de Newton para resolver ecuaciones de equilibrio no lineales.
 - **Quasi-Newton:** Usa este método para resolver ecuaciones de equilibrio no lineales. Esta técnica puede ahorrar coste computacional y es muy exitosa cuando el sistema es muy grande y la matriz de rigidez no cambia entre iteraciones. Sólo en sistemas simétricos.

Al usar este método, se deben de introducir el número máximo de iteraciones permitidas antes de que la matriz nucleo se reforme, por defecto 8 y máximo 25.

- **Contact iterations:** Usa las interacciones de contacto en lugar de las graves y regulares discontinuidades de las mismas para acelerar los cálculos. Es eficaz para la solución de los grandes problemas, geoméricamente lineales, de pequeño deslizamiento, sin fricción estática con muchas iteraciones de grandes discontinuidades.
 - Adjustment factor for the number of solutions in any iteration
 - Maximum number of contact iterations: El valor máximo de iteraciones de contacto antes de que la nueva matriz global se ensamble y factorice.



3. **Convert severe discontinuity iterations:** Pestaña desplegable que nos permite tratar las discontinuidades graves de las iteraciones durante un análisis no lineal.
 - Off: Esta opción sirve para forzar una nueva iteración si la discontinuidad es grande con independencia de la magnitud de los errores de penetración y fuerza. Además, cambia algunos parámetros del tiempo de iteración y utiliza varios criterios para determinar si se debe hacer otra iteración o un nuevo intento con un tamaño del incremento menor
 - On: Seleccionar para usar criterios de convergencia local y determinar si es necesaria una nueva iteración
 - Propagate from previous step: Es el valor predeterminado y es el valor especificado en el Step anterior.
4. **Default load variation with time:** Permite elegir si la magnitud de las cargas se aplica al inicio del Step y se mantiene constante (Instantaneous) o si se prefiere que la carga varíe de forma lineal desde el valor del Step anterior hasta el designado (**Ramp linearly over step**).
5. **Extrapolation of previous state at start of each increment** Es usado para determinar la primera suposición del método de extrapolación supuesto. La extrapolación se usa en análisis no lineales en ABAQUS/STANDARD para acelerar la solución.
 - Linear: Indica que la extrapolación debe ser lineal al 100%, en el tiempo, de la solución de incrementos anterior para comenzar la solución de la ecuación no lineal actual.
 - Parabolic: Indica que la extrapolación debe ser cuadrática, en el tiempo, de las dos soluciones incrementales anteriores para la solución de la ecuación no lineal actual.
 - None: Para eliminar cualquier extrapolación.



Static, Risk

El método Risk es usado en problemas estáticos para predecir inestabilidad y colapso de estructuras geoméricamente no lineales, también permite encontrar estados de equilibrio estáticos durante fases de inestabilidad como pueden ser respuestas de carga-desplazamiento con rigidez negativa o estructuras que liberan energía de deformación para mantener dicho equilibrio.

La Pestaña **Basic**:

1. **Description**: Permite introducir una breve descripción sobre lo que se trabajará
2. La opción **Nlgeom** no permite elegir si la geométrica será lineal durante el estudio (off) o no lineal (On).
3. **Include adiabatic heating effects** si se va a realizar un estudio de tensión en un sistema adiabático. Relevante para materiales plásticos metálicos e isotrópicos.
4. **Stopping criteria**: Ya que la magnitud de la carga es parte de la solución, esta opción es la que pide al usuario cuando terminar el Step.
 - **Maximum load proportionality factor**: Al activarlo, permite al usuario introducir el valor de proporcionalidad de carga que Abaqus usará para no permitir que se exceda esa magnitud.
 - **Maximum displacement** Al activarlo, permite introducir el valor máximo de desplazamiento del grado de libertad especificado, así como especificar la región del nodo a monitorizar. Si este valor se excede, el programa acabará el Step.

La pestaña Incrementation:

1. **Type**: Permite elegir el tamaño del tiempo de incremento.
 - **Automatic**: Abaqus/Standar elegirá el incremento de tiempo más adecuado
 - **Fixed**: El usuario elige el tamaño del incremento de tiempo
2. **Maximum numbers of increments** permite fijar el máximo número de



incrementos, el análisis se detendrá si este máximo se sobrepasa aunque no llegue a la solución.

3. **Arc lenght increment**, será útil solamente si se elige un incremento automático. Initial, Minimum y maximum, configuran el valor inicial, mínimo y máximo del incremento de la longitud del arco a lo largo de la trayectoria de equilibrio en la escala carga-desplazamiento.
4. **Estimated total arc length** permite introducir un factor de escala para la longitud del arco que se asociará al Step.

La pestaña Other:

1. **Equation solver Method** que permite elegir la matriz de almacenamiento:

Matrix storage:

- **Use solver default** : Abaqus elige si el esquema de almacenamiento y de solución es simétrico o asimétrico
 - **Unsymmetric**: Restringe este esquema a asimétrico.
 - **Symmetric**: Restringe este esquema a simétrico.
2. **Solution technique**: Esta opción permite elegir una técnica para la resolución de las ecuaciones.

Apply Contact iterations: Usa las interacciones de contacto en lugar de las graves y regulares discontinuidades de las mismas para acelerar los cálculos. Es eficaz para la solución de los grandes problemas, geoméricamente lineales, de pequeño deslizamiento, sin fricción estática con muchas iteraciones de grandes discontinuidades.

- **Adjustment factor for the number of solutions in any iteration**. Es un factor de corrección del máximo numero de correcciones correctas se dan durante es interacción.
 - **Maximum number of contact iterations**: El valor máximo de iteraciones de contacto antes de que la nueva matriz global se ensamble y factorice.
3. **Convert severe discontinuity iterations**: Pestaña desplegable que nos permite



- tratar las discontinuidades graves de las iteraciones durante un análisis no lineal.
- Off: Esta opción sirve para forzar una nueva iteración si la discontinuidad es grande con independencia de la magnitud de los errores de penetración y fuerza. Además, cambia algunos parámetros del tiempo de iteración y utiliza varios criterios para determinar si se debe hacer otra iteración o un nuevo intento con un tamaño del incremento menor
 - On: Seleccionar para usar criterios de convergencia local y determinar si es necesaria una nueva iteración
 - Propagate from previous step: Es el valor predeterminado y es el valor especificado en el Step anterior.
4. **Extrapolation of previous state at start of each increment** Es usado para determinar la primera suposición del método de extrapolación supuesto. La extrapolación se usa en análisis no lineales en ABAQUS/STANDARD para acelerar la solución.
- Linear: Indica que la extrapolación debe ser lineal al 100%, en el tiempo, de la solución de incrementos anterior para comenzar la solución de la ecuación no lineal actual.
 - Parabolic: No relevante en este tipo de Step.
 - None: Para eliminar cualquier extrapolación.
5. **Stop when region “ ” is fully plastic:** Esta opción se selecciona cuando se desea que una región (la cual se nombrará en el espacio designado) sea analizada por la teoría de deformación plástica. Este estudio acabará cuando todos los puntos del cálculo sean completamente plásticos. Sin embargo, el estudio del Step puede acabar si el máximo número de incrementos especificados ha sido excedido.
6. **Accept solution after reaching maximum number of iterations:** Esta opción sólo se puede activar si se eligió en Incrementation un tipo de incremento fijo. Lo que esto hace, es obligar a aceptar la solución justo un incremento después del máximo número de incrementos, incluso si las tolerancias de equilibrio no son satisfactorias.
7. **Obtain long-term solution with time-domain material properties:**

**Visco:**

La configuración de la pestaña **Basic** empieza con **Description**, un pequeño cuadro de texto donde describir el step. Seguido de **Time Period** que nos indica el tiempo. La opción **Nlgeom** nos permite elegir si la geométrica será lineal durante el estudio (off) o no lineal (On).

El desplegable **Automatic Stabilization**, se activa cuando se esperan problemas relacionados con el padeo, arrugas en la superficie o inestabilidad del material; por lo que se aplicará un coeficiente de amortiguamiento a cada Step ya que no se traslada.

- **Specify dissipated energy fraction:** Esta opción asume que el problema es estable al inicio y que las inestabilidades se pueden ir desarrollando en el step, por ello, se introduce un valor de amortiguación basado en una fracción de energía de deformación disipada.
- **Specify damping factor** También puede especificar el factor de amortiguamiento directamente. Desafortunadamente, por lo general es bastante difícil hacer una estimación razonable para el factor de amortiguamiento a menos que un valor se conoce a partir de la salida de ejecuciones anteriores; el factor de amortiguamiento incluye información no sólo sobre la cantidad de amortiguación, pero también se trata de tamaño de malla y el comportamiento del material.
- **Use damping factors from previous general step** para obtener el factor de amortiguación de la etapa actual a partir del último de la etapa previa. Hay que tener en cuenta que este método anulará los factores de amortiguación que se asignen directamente y si no se puede asociar un factor desde la etapa anterior, Abaqus usará adaptive stabilization para determinarlo.

La pestaña **Incrementation** comienza pidiendo el tipo de incrementación:

Eligir Automatic si se desea que Abaqus/standar determine el incremento adecuándolo al tamaño de tiempo.

Elegir Fixed y el usuario especifica el tamaño directo del incremento, entonces



Abaqus/standar usará un tamaño mínimo de la constante.

Maximum Number of Increments permite fijar el máximo número de incrementos, el análisis se detendrá si este máximo se sobrepasa aunque no llegue a la solución.

El siguiente paso, Increment size, será útil solamente si se elige un incremento automático. Initial, Minimum y maximum, configuran el valor inicial, mínimo y máximo del incremento de tiempo permitido por cada paso, aunque Abaqus/Standar puede comenzar y disminuir éste si lo cree necesario para el estudio.

Creep/swelling/viscoelastic strain error tolerance Permite introducir la máxima diferencia en el incremento por deformación a fluencia, permitiendo la exactitud del cálculo.

Creep/swelling/viscoelastic integration: Permite elegir entre las opciones de integración explícita/implícita, Abaqus elegirá la que necesite, implícita actuará mejor a fluencia de bajos niveles de tensión, o explícita únicamente, menos costosa computacionalmente.

En la pestaña **Other** encontramos los siguientes apartados:

1. **Equation solver Method** que permite elegir el método de cálculo y la matriz de almacenamiento:

Method puede ser Direct, elección del método directo por defecto, o Iterative, método de resolución iterativo lineal.

Matrix storage:

- **Use solver default:** Abaqus elige si el esquema de almacenamiento y de solución es simétrico o asimétrico
- **Unsymmetric:** Restringe este esquema a asimétrico.
- **Symmetric:** Restringe este esquema a simétrico.

2. **Solution technique:** Esta opción permite elegir una técnica para la resolución de las ecuaciones.



- **Full Newton:** Usa el método de Newton para resolver ecuaciones de equilibrio no lineales.
- **Quasi-Newton:** Usa este método para resolver ecuaciones de equilibrio no lineales. Esta técnica puede ahorrar coste computacional y es muy exitosa cuando el sistema es muy grande y la matriz de rigidez no cambia entre iteraciones. Sólo en sistemas simétricos.

Al usar este método, se deben de introducir el número máximo de iteraciones permitidas antes de que la matriz nucleo se reforme, por defecto 8 y máximo 25.

- **Contact iterations:** Usa las interacciones de contacto en lugar de las graves y regulares discontinuidades de las mismas para acelerar los cálculos. Es eficaz para la solución de los grandes problemas, geoméricamente lineales, de pequeño deslizamiento, sin fricción estática con muchas iteraciones de grandes discontinuidades.
 - **Adjustment factor for the number of solutions in any iteration**
 - **Maximum number of contact iterations:** El valor máximo de iteraciones de contacto antes de que la nueva matriz global se ensamble y factorice.

3. **Convert severe discontinuity iterations:** Pestaña desplegable que nos permite tratar las discontinuidades graves de las iteraciones durante un análisis no lineal.

- **Off:** Esta opción sirve para forzar una nueva iteración si la discontinuidad es grande con independencia de la magnitud de los errores de penetración y fuerza. Además, cambia algunos parámetros del tiempo de iteración y utiliza varios criterios para determinar si se debe hacer otra iteración o un nuevo intento con un tamaño del incremento menor
- **On:** Seleccionar para usar criterios de convergencia local y determinar si es necesaria una nueva iteración
- **Propagate from previous step:** Es el valor predeterminado y es el valor especificado en el Step anterior.

4. **Default load variation with time:** Permite elegir si la magnitud de las cargas se aplica al inicio del Step y se mantiene constante (Instantaneous) o si se prefiere que la carga



varíe de forma lineal desde el valor del Step anterior hasta el designado (**Ramp linearly over step**).

5. **Extrapolation of previous state at start of each increment** Es usado para determinar la primera suposición del método de extrapolación supuesto. La extrapolación se usa en análisis no lineales en ABAQUS/STANDARD para acelerar la solución.
- **Linear:** Indica que la extrapolación debe ser lineal al 100%, en el tiempo, de la solución de incrementos anterior para comenzar la solución de la ecuación no lineal actual.
 - **Parabolic:** Indica que la extrapolación debe ser cuadrática, en el tiempo, de las dos soluciones incrementales anteriores para la solución de la ecuación no lineal actual.
 - **None:** Para eliminar cualquier extrapolación.

3.4.2. MÓDULO INTERACTION

El módulo Interaction sirve para definir y manejar interacciones mecánicas y térmicas entre las regiones de un modelo o entre una región y sus alrededores, análisis de contacto y en los límites de regiones, inercias, grietas, resortes, amortiguación...

Las interacciones son dependientes del Step y el objeto sobre el que se realizan, por lo que deben ser asociadas tanto al Step de trabajo deseado como a la pieza.

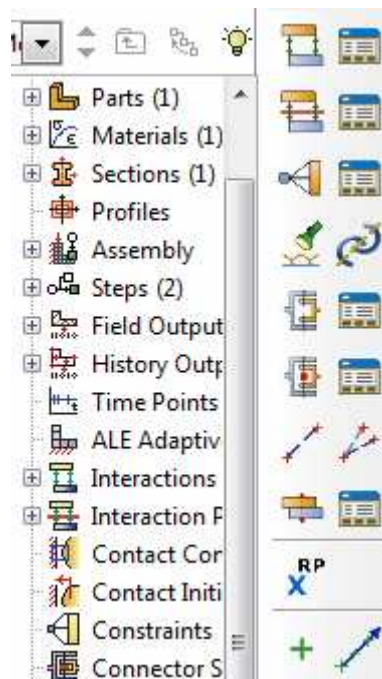



Fig. 15 – Detalle herramientas

Dentro de este módulo, se encuentran albergadas las opciones de Interactions, Contact, Constraints, Connector y Special, que son la forma de definir y dar propiedades a las acciones que se generan.

Interactions

Para crear una interacción, desde el menú **Interactions->create...** o bien pulsando el botón create interactions . Se abre la ventana de creación de la interacción, donde se



debe especificar el nombre y el step donde actuará y estará activo, así como el tipo de interacción. Al estar asociado al step, las interacciones dependerán del tipo de trabajo y no se pueden seleccionar todas las opciones. Una vez seleccionado, pulsar **continue...** para continuar y elegir la región donde realizar dicha acción.

Las interacciones que se pueden definir se especifican a continuación:

1. **General Contact:** Sólo definible en el step inicial y es activado en todas las subsecuencias, permite conocer las interacciones de todas las caras o de las seleccionadas.
2. **Surface-to-surface contact:** Usado para el contacto entre una superficie deformable y otra superficie rígida o deformable también.
3. **Self-contact:** Alternativa al general contact, permite realizar el contacto en cualquier step y describe el contacto entre diferentes áreas de una superficie.
4. **XFEM crack growth:** Solamente cuando se ha creado una grieta o se desea crear y se ha definido.
5. **Cyclic symmetry:** Usado para modelar a partir de una única parte, toda una estructura con simetría cíclica total.
6. **Actuator/sensor** Permite modelar componentes de control de sistemas.
7. **Elastic foundation:** Sólo definible en el step inicial y es activado en todas las subsecuencias, permite modelar los efectos de rigidez distribuido en una superficie sin llegar a modelar los detalles.
8. **Acoustic impedance:** Especifica la relación entre la presión en un medio acústico y el movimiento normal de una estructura acústica.
9. **Cavity radiation:** Describe la transferencia de calor debido a la radiación en cavidades.
10. **surface film condition:** Permite modelar transferencia de calor en superficies por convección.
11. **Waves:** Actúa solamente en el step asignado y sirven para calcular cargas provenientes de ondas acústicas externas.

12. **Concentred film condition:** Permite modelar transferencia de calor de por convección de uno o más puntos.
13. **Concentred radiation to ambient:** Permite modelar la transferencia de calor entre uno o más puntos en un conjunto y un entorno no refractario mediante la creación de una radiación puntual hasta la temperatura ambiente.

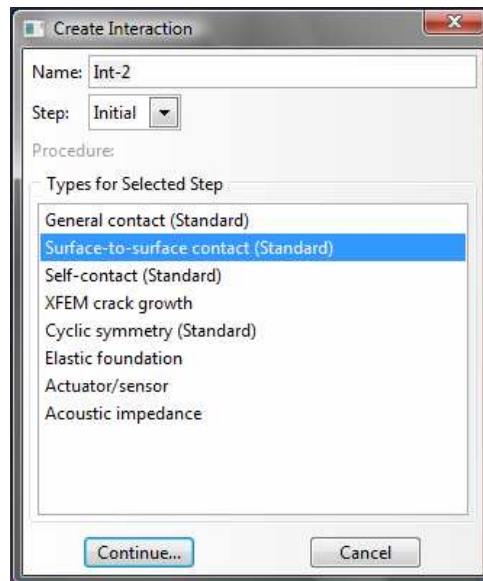



Fig. 16 – Ventana crear interacciones

Interactions Properties

Conjunto de datos o propiedades que definen un tipo de interacción, pero que no dependen directamente de ella. Existen seis tipos de propiedades en Abaqus y se crean desde el menú Interactions/Property... o el botón .

1. **Contact:** Define el comportamiento tangencial y normal de un contacto, así como información sobre amortiguación, la conductancia térmica, radiación térmica, y la generación de calor debido a la fricción. Hace referencia a las interacciones de contacto.
2. **Film condition:** Permite definir el coeficiente de película como una función de las variables de campo y temperatura. Sólo hace referencia a film condition interaction.
3. **Cavity radiation:** Define la emisividad de una cavidad como función de las

variables de temperatura y campo. Sólo hace referencia a cavity radiation interaction.

4. **Incident Wave:** Define la velocidad de la onda incidente y otras características de la carga de onda.
5. **Actuator/sensor:** Permite realizar subrutinas de cálculo.

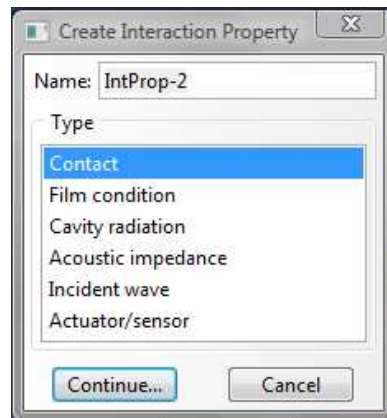



Fig. 17 – Ventana crear interacciones

Contact

El uso de esta opción está diseñado para expertos en Abaqus, ya que está diseñado para modificar los algoritmos de cálculo y así hacer cumplir las condiciones de contacto. Las opciones a elegir son **Abaqus/Standar contact controls** o **Abaqus/Explicit contact controls**, sin embargo, al ser una función para expertos como ya se ha indicado, no entra parte de este manual.

Constraints

Esta opción permite definir una serie de restricciones a la hora del cálculo. Para llevarlas a cabo, desde el menu Constraint/Create... o pulsando el botón .

1. **Tie:** Une o enlaza dos superficies separadas entre sí, de modo que no haya movimiento relativo entre ellas. Esto permite fusionar dos superficies a pesar de



que el mallado entre ellas sea diferente.

El funcionamiento es el siguiente, primero se eligen las regiones a enlazar, maestra y esclava y posteriormente se elige el método de discretización, las tolerancias y los distintos ajustes que se permitan.

2. **Rigid body:** Une diferentes regiones sobre un punto de referencia generando un cuerpo rígido. Este cuerpo rígido es un conjunto de regiones asociadas a dicho punto no deformable que se rigen por el movimiento de dicho nodo.

Permite elegir el tipo de región que formara el cuerpo rígido, elementos geométricos, nodos o superficies analíticas y el punto de referencia. También acepta la opción de convertir ese punto en el centro de masas y la unión de superficies isotermas (sólo en análisis donde la tensión y la temperatura estén relacionadas).

3. **Display body:** Crea una Part Instance del cuerpo seleccionado que trabaja de forma virtual, es decir, ninguna de sus partes entra en el análisis y se comporta como un Rigid body, favoreciendo así la velocidad de cálculo de otras partes. Se utiliza fundamentalmente cuando diferentes partes de un conjunto no entran dentro de ese análisis pero sí forman parte del conjunto.

La Instance creada, puede quedarse fija o seguir a uno o tres puntos diferentes.

4. **Coupling:** Restringe el movimiento de una superficie al del nodo seleccionado.
5. **MPC Constraint:** Restringe el movimiento de los nodos de una región al seleccionado.

Este tipo de restricción puede definirse como Beam (conexión viga rígida), Tie (activa todos los grados de libertad como el caso maestro-esclavo), Pin (unión tipo clavo), Elbow (codos), User-defined (necesidad de uso de subrutinas)

6. **Shel-to-solid coupling:** Permite acoplar la arista de un elemento tipo Shell a la cara de un sólido adyacente.
7. **Embedded region:** Incrusta una región dentro de otra o del modelo general.

Una vez seleccionada la región que se incrusta dentro de otra, se introducen los parámetros de tolerancia en las opciones Weight factor roundoff tolerance (valor por defecto 10^{-6}).

8. **Equation:** Consiste en aplicar un coeficiente a los grados de libertad de todos los nodos de un conjunto.

Special

Aparece dentro del árbol Engineering Features y define las siguientes propiedades:

1. **Inertia:** Se puede definir desde el modulo property o el módulo assembly y define los centros de masa e inercia de un modelo. Las posibilidades que ofrece son:
 - Point/mass inertia: Permite calcular la masa concentrada y la inercia rotacional en un punto y en Abaqus/Standard la masa y la inercia de la amortiguación.
 - Nonstructural mass: Permite calcular la masa no estructural.
Esta se puede obtener a través de la masa total o la pasa por volumen, área o longitud, la magnitud y el tipo de distribución.
 - Heat capacitance: Permite definir la capacitancia calorífica en el modelo.

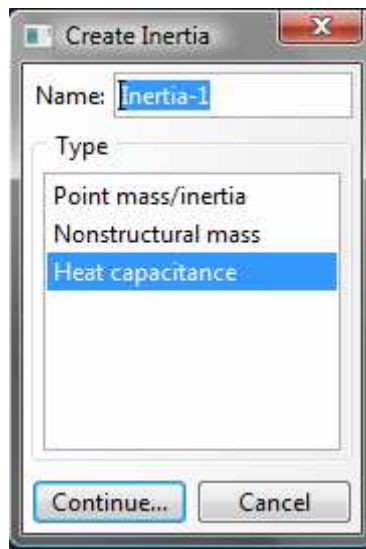





Fig. 18 – Ventana crear inercias

2. **Crack:** crea una costura para una grieta que se definirá en una cara, línea o arista. Ofrece dos opciones de cálculo:
 - Contour integral: Permite predecir la aparición de grietas en estudios cuasiestáticos pero no su propagación.
 - XFEM: Permite estudiar el inicio y la propagación de grietas.

3. **Fasteners:** Define la unión punto a punto de dos o más caras como uniones atornilladas, soldaduras o remaches. Tiene dos opciones, Point-based, hace uso de puntos de posición para el cálculo de las uniones, Discrete, que usa líneas para ello.
4. **Springs/Dashpots:** Define resortes y amortiguadores o las propiedades de amortiguación y elásticas de distintos puntos. Si se activan las dos opciones hay que tener en cuenta que estas actuarán en paralelo. Tiene dos tipos de conexión de puntos:
 - Connect two points: Crea y/o edita los resortes y amortiguadores en pares de puntos
 - Connect points to ground: Crea y/o edita los resortes y amortiguadores conectando los puntos a tierra.

Connector


Los conectores, permiten la unión de dos puntos entre sí del assembly o de un punto a tierra. Son necesarios tres pasos para modelarlos:

- Crear un **wire feature**,  crea una línea, un grupo de líneas o calbes a tierra para definir la geometría de la conexión.
- **Connector section** , especifica las conexiones y las propiedades de dichas uniones, así como los datos y la definición de la sección .
- **Connector section assignment** , asigna un conector a la región específica.

3.4.3. MÓDULO LOAD

El módulo Carga, permite definir las condiciones de contorno con sus grados de libertad, las cargas aplicables al estudio, predefined field, que son una serie de condiciones iniciales que se definen antes de cada step y la herramienta amplitud para las condiciones de aplicación de cargas.

1. Load: La opción load permite configurar las cargas en el modelo durante uno o varios step, dependiendo de las necesidades, no pueden aplicarse como condiciones iniciales, por lo que el step inicial no podrá ser utilizado.

Para comenzar a crear una carga, desde el menú Load/ Create.... o pulsando el botón . Se abrirá una ventana que permitirá dar nombre a la carga aplicada, así como aparecerá un desplegable para seleccionar en qué Step se iniciará la acción. Como la carga depende del tipo de step, Abaqus/Standard tan solo permite seleccionar la categoría de la carga que puede definirse en dicho estudio y dentro de las cuales existen una lista a seleccionar.

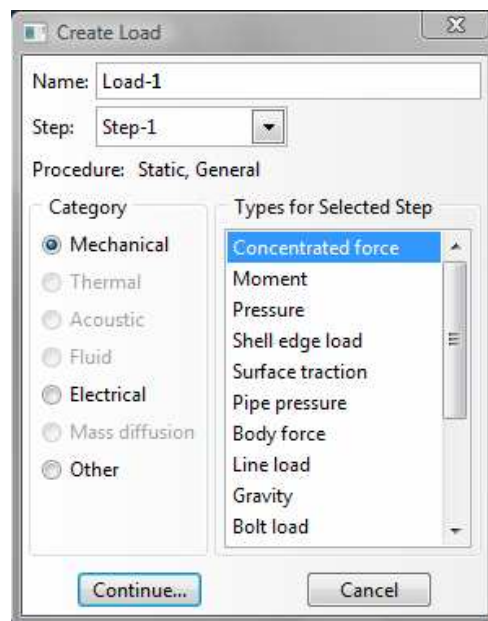



Fig. 19 – Ventana crear cargas

Una vez seleccionado el tipo de carga y clicado en Continue.... se selecciona la región de aplicación y a continuación otra ventana con las propiedades para definir dicha carga se especifican.

Las cargas pueden propagarse a siguientes step definidos con posterioridad si se desea.

2. BC: En el menú BC o  se diseñan las condiciones de contorno y los grados de libertad del modelo. Estas condiciones pueden ser iniciales o desarrollarse en cada step.

Al igual que en loads, aquí aparece una pantalla donde se puede introducir un nombre para las condiciones y el step donde se inicia, aunque se puede propagar a todos los demás step si se desea.

Category, permite seleccionar entre propiedades mecánicas y otras como presión en los poros, potencial eléctrico etc. Una vez definida la categoría y seleccionado el tipo de condición, tras clicar en Continue... se selecciona la región de aplicación y a continuación otra ventana con las propiedades para definir dicha condición.

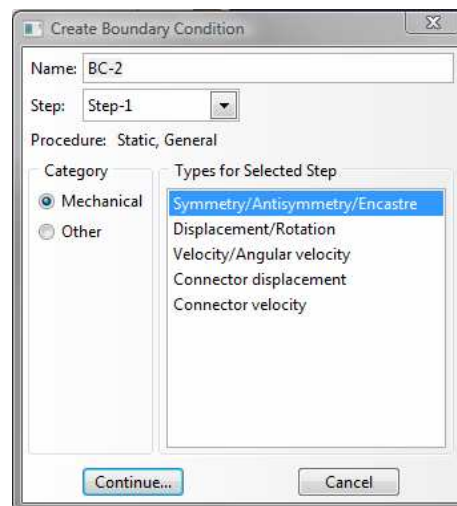



Fig. 16 – Ventana crear condiciones de contorno

3. Load case: Es posible crear un load case únicamente en los análisis definidos como static perturbation, direct steady-state dynamic y SIM-based steady-state dynamic
4. Predefined Fields: Permite generar un tipo de condiciones iniciales en las secciones seleccionadas. Para comenzar a crear un predefined field, desde el menú Predefined field/

Create.... o pulsando el botón . Se abrirá una ventana que permitirá dar nombre, así como aparecerá un desplegable para seleccionar en qué Step se iniciará la acción. La categoría en este caso será mecánica u otra, que incluye temperatura, estado inicial...

Una vez seleccionado el tipo de carga y clicado en **Continue....** se selecciona la región de aplicación y a continuación otra ventana con las propiedades para definir dicha carga se especifican.

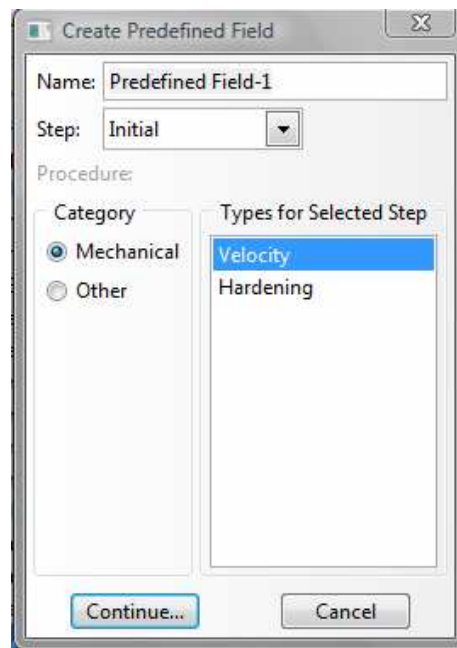


Fig. 21 – Ventana crear condiciones predefinidas

Amplitude:

Amplitude es una herramienta que se puede utilizar en el módulo interaction o en load, sin embargo, debido a su utilidad se ha decidido estudiar a parte.

Esta herramienta permite especificar variaciones de tiempo y frecuencias en cargas, desplazamientos y alguna que otra interacción durante un step o el total del tipo de estudio. Para definir dichas curvas de amplitud, el programa permite definirlas como una función matemática, por discretización (una serie de puntos), a través de subrutinas definidas por el usuario o a partir de una variable dependiente (sólo en Abaqus/Standard).

Para crear una amplitud, a través del menú **Tools/Amplitude/Create...** o pulsando en el árbol  **Amplitudes**.

Aparecerá una ventana donde se podrá dar nombre a la amplitud y posteriormente se podrá elegir el tipo, tras pulsar **Continue....** Aparecerá una nueva ventana con las características a rellenar.

1. **Tabular:** Obtiene la curva de amplitud mediante discretización, se introduce un valor de tiempo o frecuencia y su valor en la curva, así como diferentes correcciones y Abaqus se encarga de interpolar de forma linear los datos según convenga.
2. **Equally spaced:** permite introducir valores de amplitud para tiempo fijos, Abaqus interpola linealmente entre dichos valores fijos.
3. **Periodic:** Define la amplitud como la función matemática, en concreto como una serie periódica, la serie de Fourier.

$$a = A_0 + \sum_{n=1}^N [A_n \cos n\omega(t - t_0) + B_n \sin n\omega(t - t_0)] \quad \text{for } t \geq t_0,$$

$$a = A_0 \quad \text{for } t < t_0,$$

4. **Modulated:** Define la amplitud como una función matemática

$$a = A_0 + A \sin \omega_1(t - t_0) \sin \omega_2(t - t_0) \quad \text{for } t > t_0,$$

$$a = A_0 \quad \text{for } t \leq t_0,$$

5. **Decay:** Define la amplitud como una función matemática

$$a = A_0 + A \exp(-(t - t_0)/t_d) \quad \text{for } t \geq t_0,$$

$$a = A_0 \quad \text{for } t < t_0,$$

6. **Solution dependent:** Define la amplitud como un valor dependiente. Empieza con un valor introducido por el usuario y seguirá su cálculo hasta que éste este dentro de los valores máximo y mínimo, tambien valores introducidos.
7. **Smooth step:** Define la amplitud entre dos puntos consecutivos

$$a = A_i + (A_{i+1} - A_i) \xi^3 (10 - 15\xi + 6\xi^2) \quad \text{for } t_i \leq t \leq t_{i+1},$$

$$\xi = (t - t_i)/(t_{i+1} - t_i)$$

8. **Actuator:** Define la amplitud a través de co-simulación (nivel avanzado).
9. **User:** Definirá la amplitud a través de subrutinas definidas por el usuario (nivel

avanzado), permitiendo usar el número de variables que se desee.

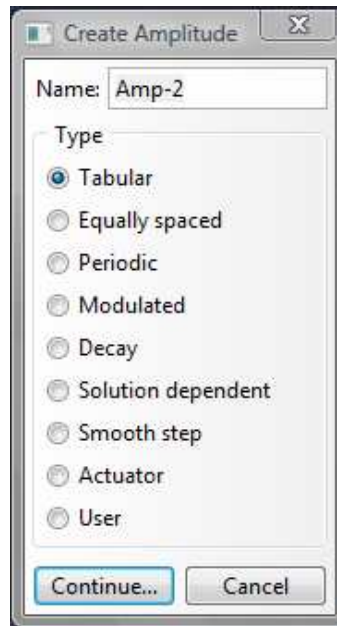


Fig. 22 – Ventana crear amplitud.

3.4.4. MÓDULO MESH

En este apartado es donde se define el mallado de la pieza o del conjunto de trabajo, es decir,

El mallado consiste en dividir la zona de trabajo en pequeños puntos, líneas, superficies o volúmenes para facilitar los cálculos que se deseen realizar. Esta técnica tiene como base el uso de nodos, puntos ficticios donde se realizan los cálculos necesarios y que devuelven un resultado necesario en el siguiente nodo.

Abaqus/CAE, permite realizar el mallado a piezas y conjuntos tipo Part o Assembly, dependiendo de si a la hora de crear el Instante este fuese dependiente o independiente. Así mismo, al poseer atributos para modelar esta malla como tipo de elementos, técnicas de mallado, etc. el modelo de estudio puede modificarse para adaptarse a dicho mallado.

Para empezar a realizar el mallado, seleccionar del desplegable Module la opción Mesh. Desde la barra de menú se pueden acceder a los procesos necesarios o también a través de la caja de herramientas.

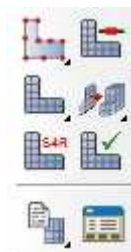


Fig. 23 – Herramientas de mallado.

Seed:

Para comenzar con el mallado es necesario diferenciar entre dependiente e independiente y si es una sola pieza o varias, ya que las instances dependientes o los conjuntos deben ser seleccionados para poder comenzar.

Seed sirve para generar un conjunto de nodos a través de las aristas del modelo formando así lo que se conoce como la densidad de mallado. A mayor número de seed, aumentará la densidad del mallado y parte de su geometría se modificará.

Dependiendo del tipo de instance la densidad de mallado se puede realizar por **Part, edge by number, edge by size, edge biased**.

Por orden de aparición anterior, cada opción realiza el mallado a partir del tamaño medio del elemento, número de elementos a través de la arista seleccionada, tamaño del elemento a lo largo de una línea o arista (si resulta no proporcional, ABAQUS/CAE modificará ligeramente este elemento) o a través de la proporcionalidad de tamaño entre el elemento mayor y el menor en la arista y el número de elementos (si este ratio es mayor que 1, se obtendrá una distribución no uniforme).

Así mismo, dentro del menú Seed, existen las opciones de eliminar los nodos creados, tanto del part/instance completo como el de las líneas o aristas seleccionadas.

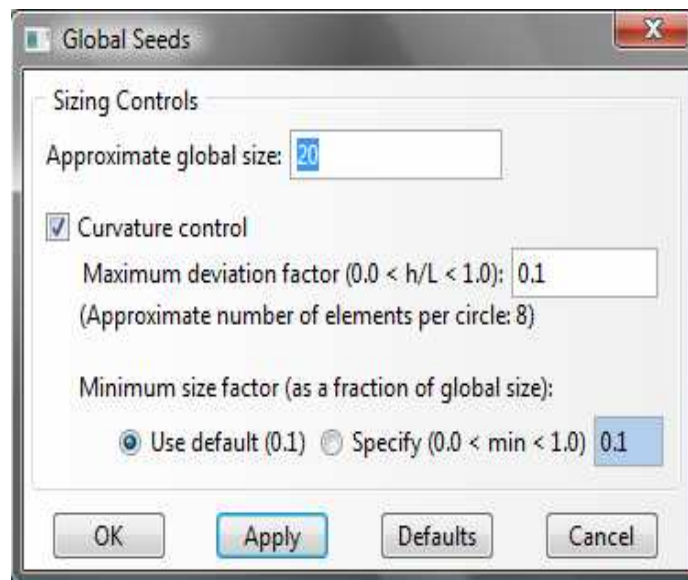


Fig. 24 – Ventana tamaño de nodo

Mesh:

Mesh controls: Esta opción permite seleccionar la forma de unión de los nodos creados anteriormente, o lo que es lo mismo, la forma que tendrá la malla.

Desde el menú **Mesh-> Controls...** o pulsando en la caja de herramientas, aparecerá una ventana denominada Mesh Controls.

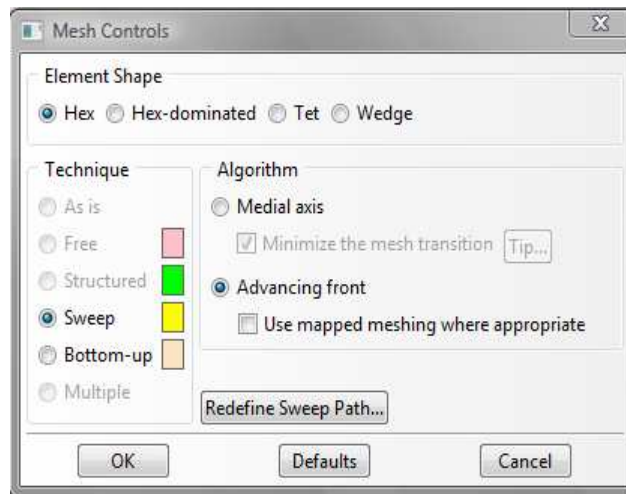


Fig. 25 – Ventana asignación tipo de malla

La primera opción permite elegir la forma del elemento, aunque el programa selecciona dependiendo de la geometría, esta se puede modificar.

Para regiones bidimensionales las opciones son:

Quad, elementos cuadriláteros exclusivamente.

Quad-dominated usa principalmente cuadriláteros pero en zonas de transición puede usar triángulos.

Tri, elementos triangulares exclusivamente.

Para regiones tridimensionales, las opciones son Hex (hexaédricos), Hex-dominated (Hexadecimales con opción a prismas), Tet(tetraédricos) y Wedge (prismas o cuñas).

Técnica, es la opción que permite seleccionar la técnica de mallado dependiendo de la geometría de la región y los elementos que conforman la malla. Al depender de estos factores no todas las opciones están disponibles siempre.

As is, se utiliza cuando en un Step previo se han seleccionado distintas regiones con técnicas de mallado diferentes y se quiere repetir el mismo proceso.

Free no utiliza ningún patrón de mallado preestablecido, por lo que predecir es difícil predecir el tipo de mallado.

Structured crea un mallado a través de patrones preestablecidos simples como pueden ser cuadrados, cubos, etc.

Sweep crea mallas por barrido, desde una cara o región genera el patrón y copia los nodos por barrido. Se usa para mallados complejos.



Bottom-up es una técnica que debe asignar manualmente en la región para que sea generada.

Multiple es usado cuando se cambia la forma del mallado, element shape, y existen varias regiones malladas con antelación, permitiendo que la técnica de mallado sea modificada para ser la más apropiada.

Algorithm es una opción que depende tanto de los elementos como de la técnica usada, por lo que si el algoritmo es aplicable a la malla que se está creando, se activará el cuadro.

Medial axis: Aparecerá cuando en superficies se seleccionen elementos cuadrilateral o quadrilateral-dominated o en volúmenes Hex o Hex-dominated, utiliza técnicas de mallado estructural y se caracteriza porque descompone el mallado en pequeños grupos de regiones simples y minimiza las transiciones para mejorar la calidad de la malla a través de la subopción **Minimize the mesh transition**.

Advancing front: Sólo utilizable cuando los elementos son cuadriláteros o hexaedros (excepto en regiones de revolución) y genera en los bordes de la pieza cuadriláteros que los sigue generando sistemáticamente hacia el interior.

Use mapped meshing where appropriate: Mejora el mallado en las caras que lo requieran.

Use the default algorithm: Puede seleccionarse cuando se realiza una malla libre con elementos tetraédricos y permite realizar mallados más robustos.

Increase the size of the interior elements: Esta subopción favorece la eficiencia computacional y es útil cuando el interés de estudio se da en los bordes de la región ya que incrementa el tamaño de los elementos internos.

Element Type: Todas las regiones y piezas creadas, tienen asignado un element type para poder ser mallado. En esta opción se diseña el tipo de elemento que formará el mallado para que se adapte al material y el tipo de análisis deseado.

Las primeras opciones de la ventana Element type se refieren a la galería de datos para el estudio, seguida del orden geométrico (primer o segundo orden) y la familia, que hace referencia al tipo de estudio a realizar.

Posteriormente aparecerán varias pestañas con diferentes opciones, estas pestañas dependerán del tipo de geometría del mallado y la selección de cada una de ellas se realizará a través del menú Mesh->Controls.

El manejo de estas opciones creará un tipo de elemento conocido por letras y números que aparecerá en la parte inferior de la ventana.

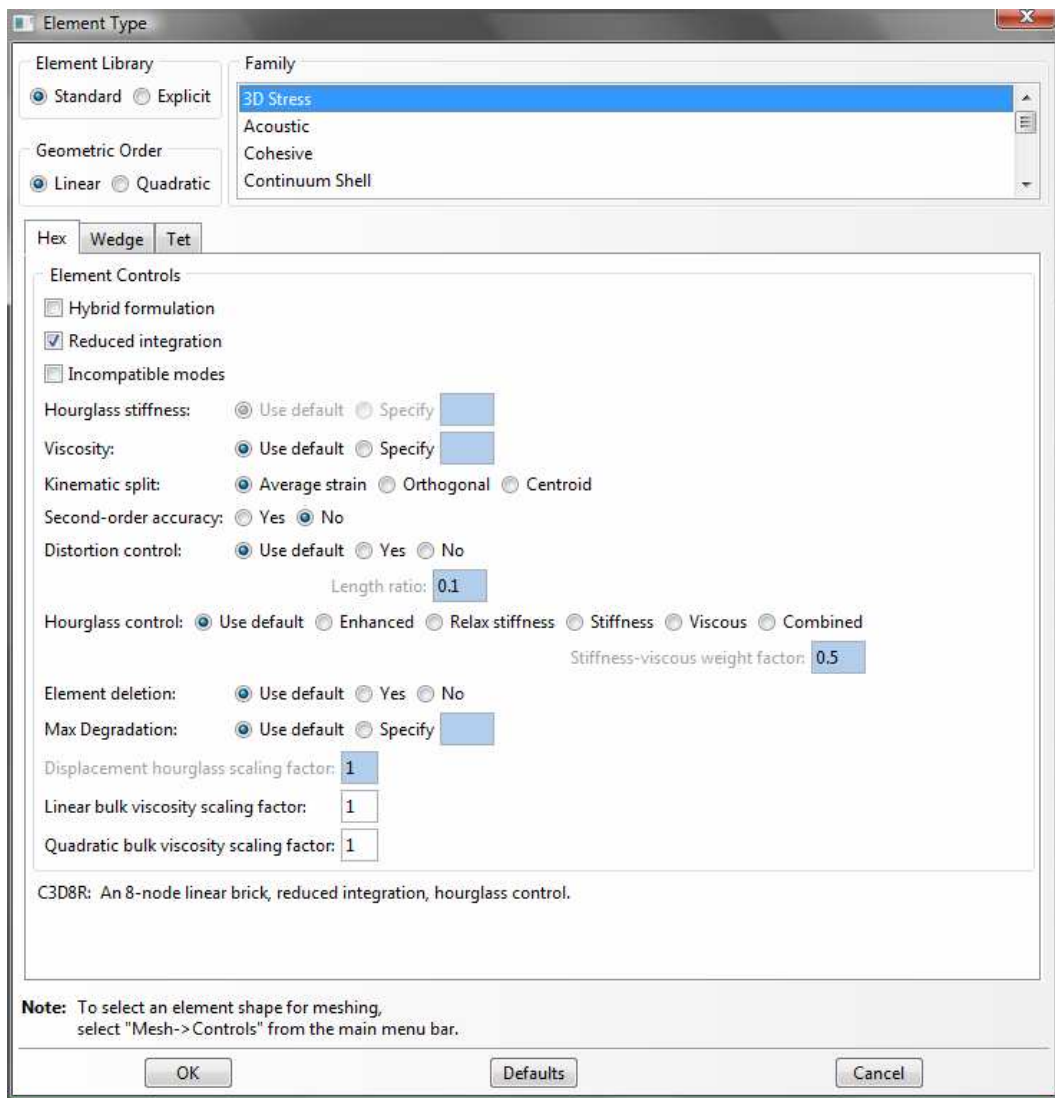


Fig. 26 – Ventana Element Type

Mesh Part/Region....: En esta opción se van a englobar 4 de las opciones del menú mesh, part..., region..., delete part mesh y delete region mesh.

Sirven para generar la malla final de un part o de una región o regiones seleccionadas así como eliminarlas para redefinir dicho mallado etc.



Esta opción permite generar la malla de forma automática salvo para mallado simétrico, bottom-up mallado y elementos que al mallarse compartan nodos en la misma instante.

Create Bottom-up mesh: Esta opción permite crear un mallado pero de forma manual en vez de automática y se utiliza cuando se necesitan elementos hexaédricos pero no se pueden generar de forma automática y cuando se necesita una zona un mallado de alta calidad.

Para poder realizar este mallado manual, en **Controls...**, debe aceptarse la opción Bottom-up.

Existen 3 tipos de mallado dentro de esta opción, Sweep, Extrude y Revolve.

Sweep: es una opción de mallado tridimensional por barrido a partir de una superficie. Para comenzar el mallado, se debe seleccionar el Source side o superficie donde empezará el mallado bidimensional, connecting sides define la trayectoria de dicho mallado, también se puede realizar dicho mallado a través de la opción Target side y Number of layers, permitiendo que el programa cree el mallado a través de la interpolación entre el origen y destino del barrido y el número de capas.

Extrude: Permite un mallado por barrido cuando la dirección de este es lineal. Se selecciona la cara mallada y un vector, mediante dos puntos, de dirección.

Revolve: Este mallado sigue siendo un barrido pero esta vez por revolución, en el cual se debe seleccionar la cara de mallado, un eje, seleccionando punto inicial y final, y el ángulo de revolución.

Las demás opciones son para deshacer o rehacer el mallado.

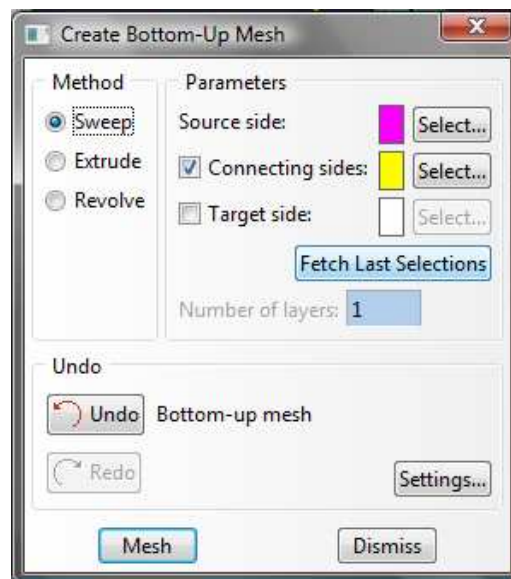


Fig. 27 – Ventana Create Bottom-Up

Associate Mesh with Geometry: Esta opción es un verificador y editor de los elementos creados por Bottom-up mesh y la geometría de la pieza o región designada.

Verify Mesh: Permite verificar la calidad de la malla obteniendo información de los nodos y elementos que la forman, así mismo, resaltarán los elementos que entren en conflicto o erróneos.

Shape metrics: Define los criterios para resaltar aquellos elementos que no cumplan la forma mínima (valores entre 0 y 1), cara de elementos con ángulos menores y mayores a cierto valor y que la diferencia entre la longitud del lado mayor y menor de un elemento no sea mayor al ratio indicado.

Size metrics: Resalta aquellos factores geométricos como la desviación geométrica (indicador de la deformación con respecto al elemento original), longitud de los lados de los elementos y el tiempo de estabilización de dichos elementos a la hora del cálculo.

Análisis check: Esta opción permite ver que elementos entran en conflicto o son erróneos de forma visual, así como ver el número de elementos creados.

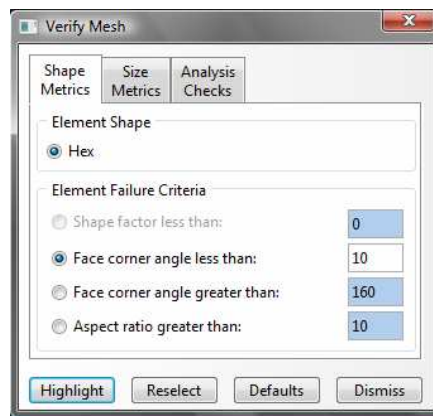


Fig. 28 – Ventana verificación mallado

Remesh Rule: Sirve para adaptar la malla de forma iterativa hasta alcanzar los indicadores de error que ha especificado el usuario.

Desde el menú Adaptativy->Remeshing Rule-> Create... se genera esta adaptación de la malla, a la que tras seleccionarla puede darsele nombre y una descripción. Seguidamente aparecerán tres pestañas:

Step and Indicator: Sirve para definir el step donde se va a realizar el remesh, así como seleccionar las variables de error y la frecuencia donde se generará.

Sizing Method: Permite definir el método para calcular el tamaño de los elementos durante el remesh y los indicadores para reducir dichos errores.

Constraints: Define los límites a las restricciones de los elementos que formaran el mallado.

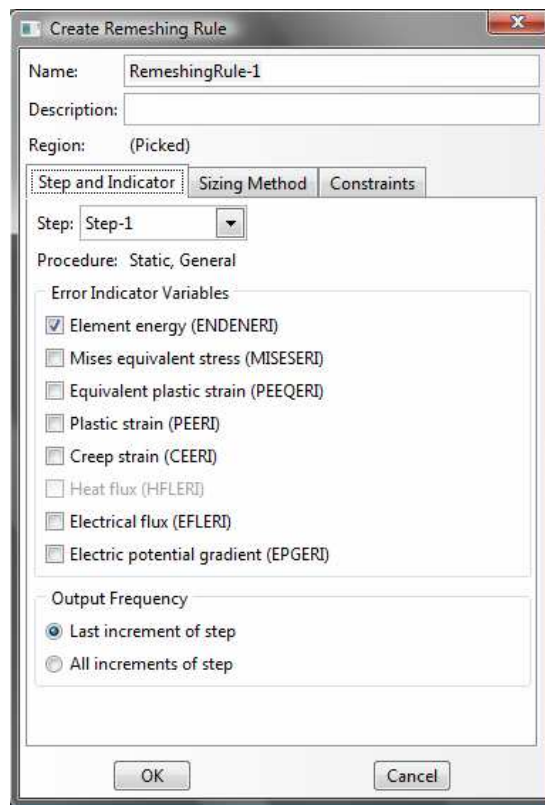


Fig. 29 – Remeshing Rule

3.5. GENERACIÓN Y VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS

3.5.1. MÓDULO JOB


El módulo job es donde se ejecutan todos los cálculos necesarios para la obtención de resultados, también puede realizar análisis adaptados y co-ejecuciones. Una vez preparado el modelo y los estudios a realizar, se crea un job y se envía a ABAQUS/STANDAR o ABAQUS/EXPLICIT para que analicen los resultados, éstos pueden ser monitorizados en tiempo real así como realizar varios análisis a la vez.

Las opciones de trabajo más importantes que se encuentran dentro de este módulo son 3: Create Job, Create adaptativy Process y Create co-execution.



Fig. 30 – Herramientas del módulo Jobs.

Job

Es el paso que enviará el estudio realizado a analizar. Para comenzar, desde Menú Job-> Create... o a partir de la barra de herramientas  y una vez seleccionado se puede realizar un nuevo Job con los datos del proyecto que se ha modelado o a partir de un archivo de entrada existente.

Una vez creado el job, se abre la ventana de edición. Tras poder darle una descripción, aparecen 5 pestañas:

- Submission: definirá el tipo de trabajo así como el modo y el tiempo de análisis.

El tipo de trabajo puede ser completo, es decir, analiza el job creado; recover, que reanaliza el job aunque este haya acabado prematuramente y la opción de calcular el modelo pero con datos guardados anteriormente.

Las otras dos opciones se refieren al momento y la forma de la ejecución del análisis, si es como segundo plano o en otro entorno o si se realiza inmediatamente se acepte o esperar a que el usuario lo decida.

- **General:** Es una pestaña que engloba una miscelanea de opciones, si se desea imprimir en un archivo .dat cuatro conjunto de datos, la opción de seleccionar el directorio donde se guardarán los archivos generados en el análisis y seleccionar el archivo de subrutina se esta se ha creado.
- **Memory:** Controla la cantidad de memoria asignada al análisis, por defecto el programa asigna una proporción de la memoria física libre en el disco, pero se puede asignar un valor en MB o GB. Así mismo se puede clicar la opción que permite al programa aumentar la memoria asignada por si fuese necesario.
- **Parallelization:** Permite controlar la ejecución de forma paralela de un análisis. Puede aplicarse tanto a ABAQUS/CAE como ABAQUS/EXPLICIT.
- **Precision:** Permite controlar la precisión del análisis de ABAQUS/EXPLICIT y de los nodos.

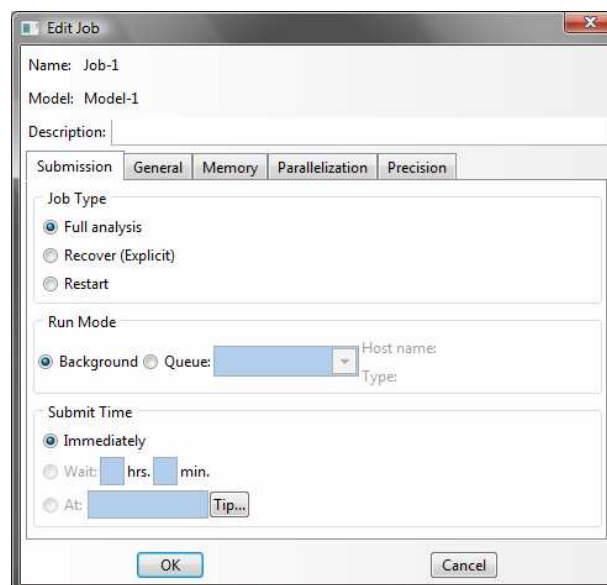


Fig. 31 – Ventana edición Job.

Para proseguir con la descripción del módulo job es importante describir la opción Job manager, en ella, además de las opciones comunes en otras opciones manager como crear, editar, copiar, renombrar y eliminar, aquí existen siete opciones más.

- **Write Input** genera un archivo de entrada sin llegar a generar el análisis.
- **Data Check** realiza una verificación del modelo.
- **Submit** se utiliza para comenzar con el análisis
- **Continue** para continuar el análisis una vez se haya comprobado el modelo.
- **Monitor...** permite visualizar el análisis en tiempo real
- **Result** visualiza los resultados del análisis
- **Kill** finaliza el análisis cuando se le indica.

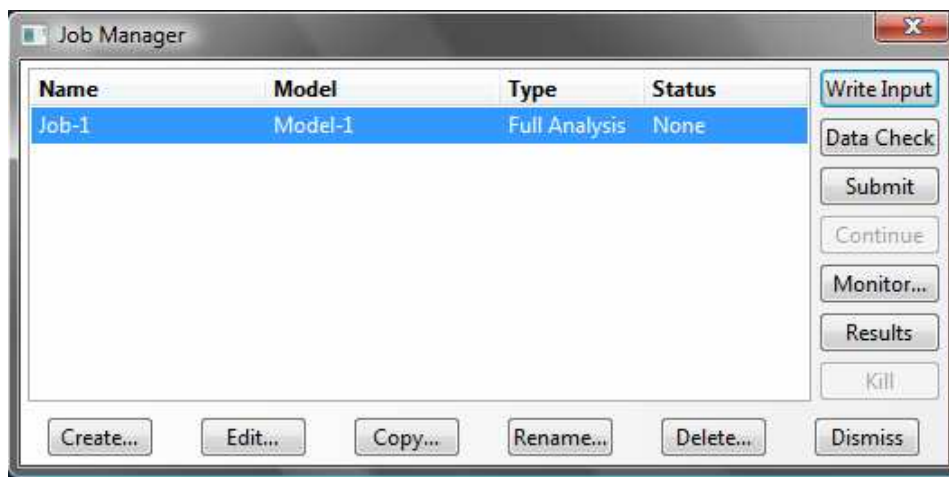


Fig. 32 – Ventana Job Manager

Adaptativy Process

Define una secuencia de jobs que se ejecutan sucesivamente según decida el usuario. Esta operación se lleva a cabo cuando se han definido en mallado remesh y lo que realiza es una modificación del mallado en ese job según el error estimado en el anterior análisis.

La ventana Create Adaptativity Process permite dar nombre al proceso, asignárselo al modelo específico, darle una descripción y un prefijo, que sirve para identificar el proceso en vez de por el nombre.

Las opciones específicas se encuentran en forma de pestañas.

- Adaptivity: Especifica el máximo número de iteraciones así como donde se ejecuta el modelo.
- General: Especifica que preprocesos deben ser “imprimidos”, el directorio donde se generará y hace llamada a las subrutinas, si las hubiese.
- Memory: Asigna la cantidad de memoria necesaria para realizar el job, puede darse en unidades o proporcional a la memoria física libre.
- Parallelization: Permite la ejecución en paralelo del número de procesos seleccionados del job analizado y el modo de hacerlo.
- Precision: Permite seleccionar la precisión a obtener en los nodos de salida.

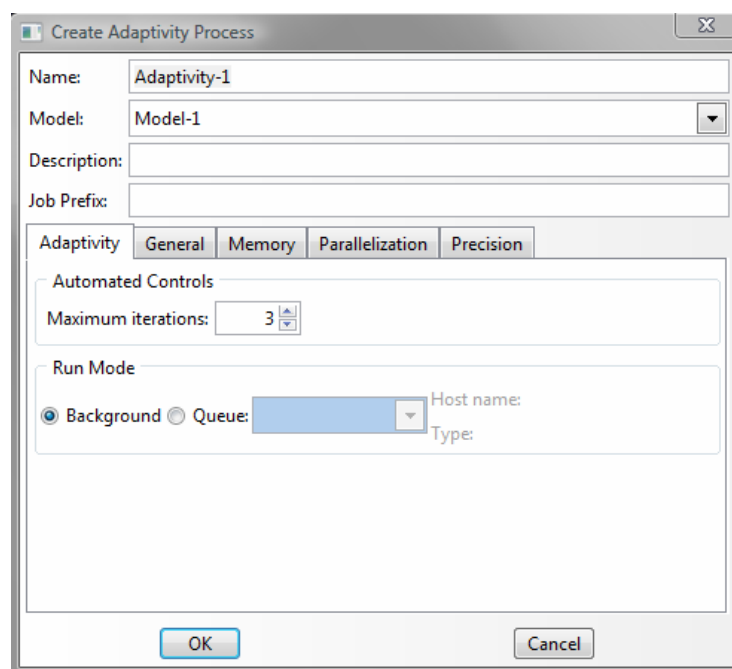


Fig. 33 – Ventana Create Adaptativity Process

Co-execution

Permite realizar una simulación simultánea de dos modelos de análisis Abaqus/Standard y Abaqus/Explicit. Para ello, se seleccionan dichos modelos y se definen las opciones de ejecución como se especifican en el menú job.

3.5.2. MÓDULO VISUALIZATION

Una vez realizado el análisis, es en este módulo donde se pueden observar los resultados así como una visión gráfica del modelo de elementos finitos. Dichos resultados dependerán de las salidas que se hayan definido en las opciones Output Request aunque ABAQUS también selecciona unas por defecto.

Al activar el módulo visualization, el entorno gráfico se modifica y aparecen una gran cantidad de nuevas opciones tanto en menú como en las barras de herramientas y en el árbol de herramientas salta a la pestaña Results.

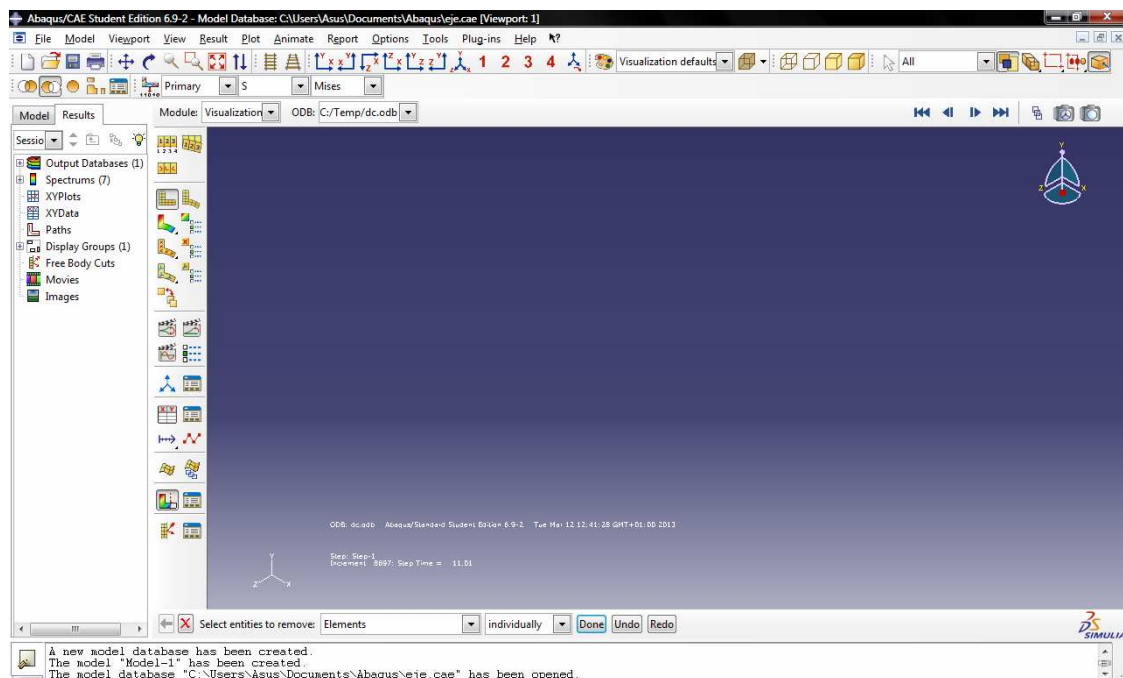


Fig. 34 – Pantalla módulo Visualization

Plot

Permite la visualización de los resultados del cálculo de elementos finitos sobre el objeto u objetos diseñados:



Undeformed shape: Muestra la forma inicial del modelo.



Deformed shape: Muestra la forma final del modelo según los valores nodales que permitan deformación.



Contours Dibuja los valores por bandas de colores del análisis a tensión del modelo.



Symbols Muestra la magnitud y la dirección de un vector especificado en el modelo.



Material orientations Dibuja la dirección de los elementos que forman el material en el modelo o en una parte específica. Esta visualización se hace en los puntos de integración.

Animate

Permite la visualización de diferentes gráficos a lo largo del tiempo desarrollando animaciones:



Time history animation Proyecta una serie de gráficos creando una película sobre la evolución del modelo.



Scale factor animation Crea una animación dependiendo de la deformación generada en el modelo.



Harmonic animation Crea una animación dependiendo del ángulo aplicado a los resultados mostrados.

Report

Esta opción permite crear gráficos procedentes de las salidas previstas, siempre que hayan sido posibles analizar, en las opciones Fields Output Request y History Output Request:



X-Y data Permite realizar un gráfico bi-dimensional de variables a elegir.



Field output Crea o selecciona datos para visualizar gráficos bi-dimensionales.



View cut Permite ver cortes del modelo para visualizar el interior, una una sección concreta etc.



4. METODOLOGÍA

4.1. METODOLOGÍA

El modelo a diseñar es un eje de tren de ruedas hueco Radsatzwelle como el que se puede observar en la figura 35, el cual, aunque se ha diseñado siguiendo la geometría real descrita en el plano, ha sido simplificado y en su diseño han sido descartados diferentes aspectos como son las aportaciones de capas de materiales antioxidantes o detalles no significativos, con el fin de facilitar los cálculos y disminuir el tiempo de respuesta del software.

4.1.1. GEOMETRÍA

El perfil a implementar es el del eje que se muestra justo aquí abajo, para observar mejor las cotas, el plano del mismo se encuentra en el anexo I. Su característica principal es que se trata de un eje ferroviario hueco.

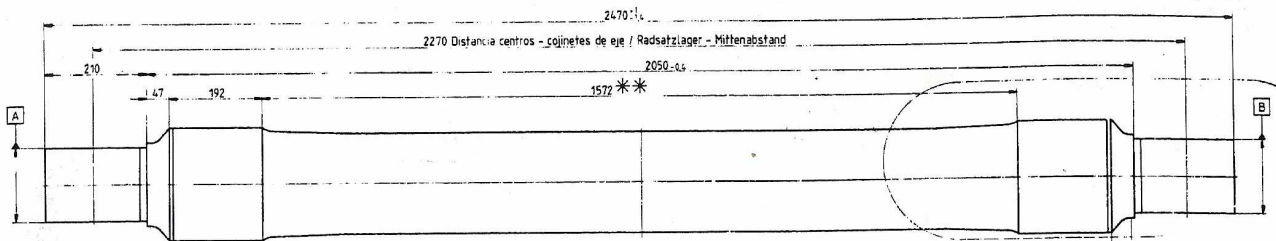


Fig. 35 – Eje ferroviario sometido a estudio.

4.1.2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

El material que se utiliza para realizar este eje es un acero forjado, templado y revenido, sin embargo, ya como se comentó al inicio de este capítulo, se van a simplificar también los datos para favorecer el cálculo por lo que se introducirán aquellos datos que influyen en los análisis. Las propiedades a aplicar se recogen en la tabla 1 y en la tabla 2, donde se representan las tensiones y deformaciones plásticas.

Tabla 1 - Propiedades del acero.

Propiedades del acero del eje ferroviario	
Densidad:	8750 kg/m³
Coefficiente de Poisson:	0.3
Modulo Young:	209 GPa
Límite de rotura	350 MPa
Modulo de cortadura	80 GPa
Límite elástico	250 MPa

Tabla 2. Tensiones y deformaciones plásticas.

Tensiones/deformaciones plásticas	
Tensión (Pa)	Deformación (mm)
200000000	0
246000000	0.0235
294000000	0.0474
349000000	0.0935

4.1.3. METODOLOGÍA APLICADA.

Una vez se ha explicado el marco teórico del proyecto, el uso de la herramienta a utilizar, la geometría y propiedades del eje a estudio, se pasa a desarrollar la metodología a implantar para conseguir los objetivos fijados. Para ello se van a realizar los siguientes pasos:

- **Modelado del eje ferroviario:** Mediante el uso del programa ABAQUS, se modela el eje a partir del plano que se encuentra en el Anexo I, para ello, se diseña un boceto en 2D, que posteriormente mediante el comando extrusión por revolución generará la pieza en 3D. El siguiente paso es asignar las propiedades del material y generar el mallado más idóneo para la geometría de revolución del eje.

- Análisis de diferentes estados tensionales: Una vez modelado el eje, se procede a asignarle las condiciones de contorno y diferentes cargas estáticas, en total diez, con el fin de comprobar que los resultados obtenidos son correctos y puede seguir usándose el software para los siguientes análisis.
- Análisis de propagación de grieta: Implantación del método XFEM y de una carga que faciliten la convergencia del estudio y así obtener el inicio y propagación de la grieta.
- Modelado de grietas en el eje: Se procede a realizar una aproximación al avance de grietas generadas en los ejes ferroviarios contando para ello con cinco posiciones y tres profundidades de grieta para cada una de ellas.

4.1.4. METODOLOGÍA APLICADA A LAS CARGAS Y RESTRICCIONES.

El estudio a estático del eje ferroviario se plantea como un problema de diferentes cargas simulando el estado real del conjunto eje, que se compone de diferentes piezas como las ruedas, caja de grases, etc. que generan diferentes cargas.

Las restricciones de movimiento se aplican en las superficies del eje que en la realidad están en contacto con las ruedas. En dichas regiones, ver restricciones en la figura 35.1, los movimientos en el eje X y en el eje Y, es decir, los movimientos que no son el desplazamiento sobre la vía, se anulan. Los giros en el eje Y y en el eje Z, también se anulan, mientras que se libera la rotación sobre el eje X, que es su eje de rotación.

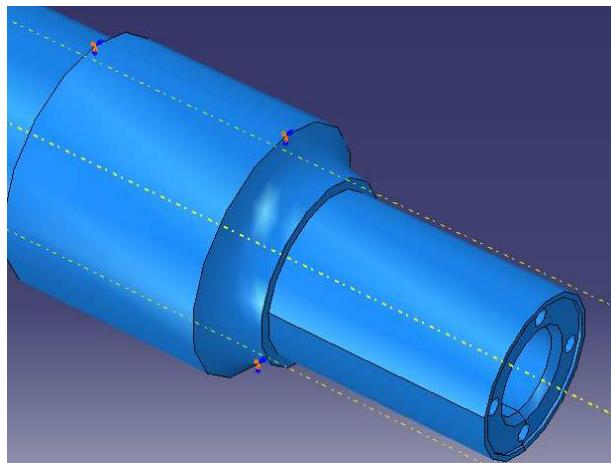


Fig. 35.1 – Restricciones en una sección del eje

Las solicitaciones a las que se va a ver envuelto el eje ferroviario se definen como cargas aplicadas sobre los extremos además de su propio peso. Las cargas se aplican como presiones por lo que se deben calcular con anterioridad, así mismo, éstas irán modificándose y aumentando progresivamente con el fin de obtener información sobre las tensiones máximas.

$$P=F/A \approx F/a \cdot b$$

En la tabla 3 aparecen las cargas a las que se realizará el estudio de tensiones.

Tabla 3 – Cargas aplicadas y presiones en superficie.

Nombre de Carga	Peso sobre el eje (kN)	Carga por apoyo (kN)	Presión (MPa)
Carga 1	100	50	1,6
Carga 2	200	100	3,2
Carga 3	300	150	4,8
Carga 4	400	200	6,4
Carga 5	500	250	8
Carga 6	600	300	9,5
Carga 7	700	350	11,1
Carga 8	800	400	12,7
Carga 9	900	450	14,3
Carga 10	1000	500	15,8

4.1.5. METODOLOGÍA APLICADA AL ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE GRIETA EN ABAQUS

El estudio de propagación de grieta se va a realizar mediante el método de modelización que incorpora ABAQUS denominado XFEM (eXtended Finite Element Method). Este método de análisis permite generar la grieta sin necesidad de ser definida por el usuario ni el uso de un mallado especial para ello. Sin embargo, el método XFEM para ABAQUS 6.9 tiene los siguientes inconvenientes que habrá que tener en cuenta para hacer un estudio lo más fiable posible:



- Sólo puede usarse en elementos lineales continuos del tipo CPE4, CPS4, C3D4, C3D8...
- No modela el crecimiento de grieta producido por la fatiga.
- Está destinado a una o varias grietas que no influyen en la geometría del problema. No puede analizar la rotura total del modelo.
- Un único elemento no puede ser atravesado por más de una grieta
- Las grietas no pueden cambiar la dirección en más de 90 grados en un solo incremento
- Las grietas no ramifican
- Sólo se pueden considerar contactos con fricciones muy bajas y que sufran pequeños desplazamientos para definir la interacción de la grieta.

Por estos motivos, se ha decidie realizar un estudio en el cual se va a introducir una presión que se propague con el tiempo hasta que supere la tensión máxima del material y gracias al método XFEM, se genere una grieta y se propague durante un número pequeño de elementos, puesto que, una vez se propaga la grieta, las condiciones de trabajo ya no son las apropiadas.

4.1.6. METODOLOGÍA APLICADA A LA GENERACIÓN DE GRIETAS

Se realizan fisuras de área circular, simplificación del frente elíptico que presentan fisuras como las generadas por fatiga. Se procede a realizar tres avances de grieta para cada posición analizada, es decir, al haber cinco posiciones se estudian quince casos distintos.

Las profundidades del frente de grieta corresponden a penetración total, fisura en la parte hueca del eje y posición media de la corona sólida. Estos datos se recogen en la tabla inferior.

Tabla 4 – Posición del frente de grieta para cada fisura.

Fisura	Posición	Posición grieta en el eje Y (mm)
1	Grieta Total	0
	Grieta en hueco	40
	Grieta al 50%	57,5
2	Grieta Total	0
	Grieta en hueco	40
	Grieta al 50%	62,5
3	Grieta Total	0
	Grieta en hueco	40
	Grieta al 50%	75
4	Grieta Total	0
	Grieta en hueco	40
	Grieta al 50%	77,5
5	Grieta Total	0
	Grieta en hueco	40
	Grieta al 50%	77,5

Como se puede ver en la figura 35.2, además de hacerse las grietas en posiciones significativas, es destacable que los puntos elegidos son puntos críticos como son los cambios de sección y las zonas con predisposición a sufrir fallos a fatiga.

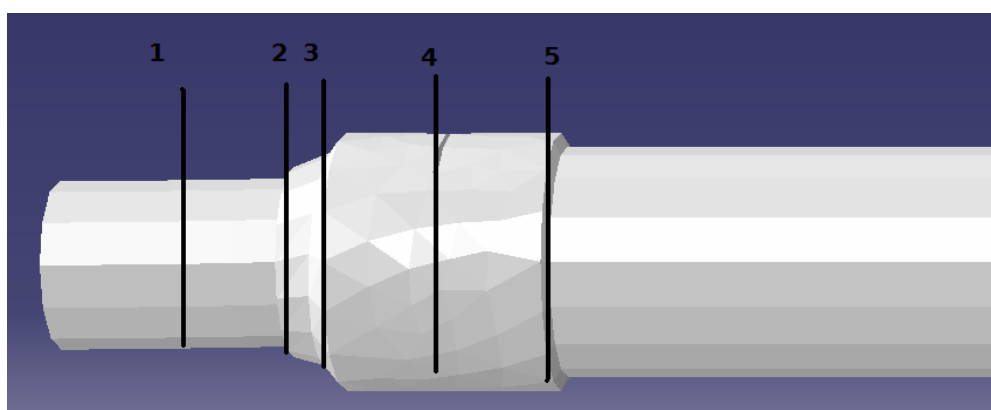


Fig. 35.2 – Posición de las grietas



5. METODOLOGÍA Y DESARROLLO

5.1. DISEÑO DEL EJE FERROVIARIO EN ABAQUS


5.1.1. MODELADO

En la sección se va a aplicar la metodología descrita anteriormente con el fin de obtener un modelo fiable del eje con el programa ABAQUS.

Para ello se explica cada paso realizado con el programa, complementando de esta forma el manual anterior, ilustrando y facilitando mediante capturas de pantalla la comprensión del proceso llevado a cabo para modelar tanto el eje como las grietas, así como para desarrollar los análisis.

5.1.2. GEOMETRÍA

Se comienza creando una pieza, part, a partir de un perfil de revolución que será el eje del tren y que se diseña a partir de una única pieza sólida. Para ello, se comienza creando un nuevo modelo de estudio a partir del menú **Model -> Create**.

Seleccionar **Part** del árbol de menú, hacer doble click o seleccionar **Create Part** del cuadro de herramientas . Aparece la ventana emergente **Create Part** que se representa en la Figura 36.

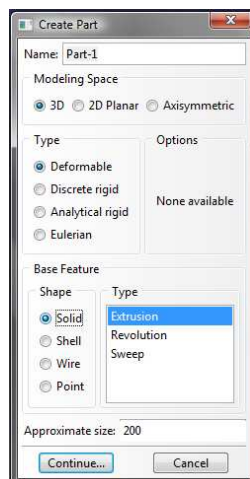




Fig. 36 – Ventana Create

Para el diseño se ha elegido un sólido de revolución en 3D de elemento deformable al que se le asigna el nombre de *eje*. El tamaño aproximado será de 2.5, teniendo en cuenta que ABAQUS trabaja sin unidades, esta medida será tomada como referencia en metros para trabajar en las unidades del sistema internacional. Pulsar Continue...

A partir de entonces, se entra en el modo Sketch.

El modo Sketch usa como zona de trabajo un plano (usualmente el plano XY, pero se puede variar) donde se crea la superficie en 2D.



Usar **Created lines: Connected**  para comenzar a dibujar el eje. Dibujar de (0,0) a (1.2225,0), (1232,-0.0453)...las coordenadas se pueden obtener a partir del plano del eje adjunto en este documento, Anexo I. Usar **Create Arc**  para los chaflanes y redondeos.

Al tratarse de una figura simétrica, tan sólo será necesario realizar el dibujo de un cuarto de dicho eje como se representa en la figura 37.





Fig. 37 – Imagen pequeña del ¼ de eje.

Para generar la otra parte del perfil del eje, en vez de dibujarlo, se puede usar la opción espejo que incorpora ABAQUS y realizar una copia simétrica desde el menú Edit.

Seleccionar **Transform -> Mirror** o pulsar . Pinchar en **Copy** y seleccionar la línea que une las coordenadas (0,-0.0625) a (0,0) como **line mirror**, es decir, la línea media del futuro eje. Será necesario seleccionar todo el dibujo con Mayus. + Botón derecho y pulsar **Done**. Por último, eliminar la línea usada como line mirror con **Delete** .

Para finalizar la construcción será necesario obtener la generatriz de revolución, la cual, debe posicionarse a 40 mm de la parte interior puesto que el eje es hueco, para posteriormente, definir los grados de la revolución, en este caso 360°.

Para generar la revolución: Crear una línea paralela a la parte interna del eje y a 40 mm del borde. Posteriormente, seleccionar **Create Constrution: Oblique Line Thru 2 Points**  y pinchar 2 puntos cuales quiera de la línea anterior, con ello lo que se consigue es crear una línea de construcción para la revolución de la pieza, salir de la esta opción mediante  y pulsar **Done** para seguir avanzando en el proceso.

En este preciso momento, Abaqus pide seleccionar una línea de construcción. Seleccionar la línea de construcción recientemente creada.

Aparece la ventada de edición de la revolución. Escribir **360** en Angle ya que se refiere al ángulo de giro respecto del eje de revolución. El botón **Flip** sirve para elegir la dirección que tomará la revolución, en este caso no importa ya que es un giro completo.

A continuación se muestra como queda la geometría del eje generado, figura 38.

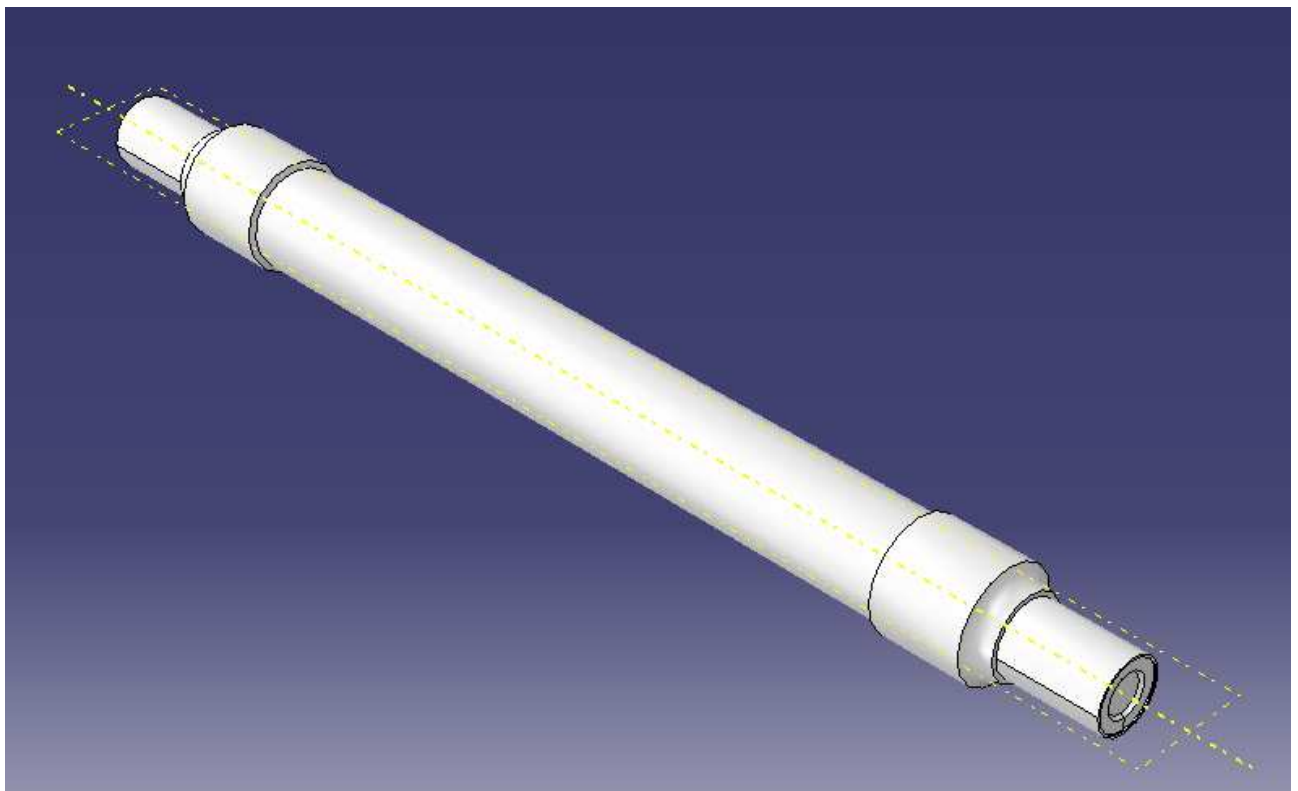




Fig. 38 – Eje Creado.

Con motivo de evitar la entrada de objetos que puedan dañar el eje por el interior, los ejes huecos llevan incorporados unas tapas atornilladas. Para poder colocar dichas tapas, en el eje se realizan unos taladros de métrica M16, los cuales, no deberían interferir

en el análisis de tensiones, por lo que, se introducen para realizar un estudio más detallado.

Mediante el menú **Part->Cut->Extrude**, o desde el menú árbol, selección del botón . El programa pide seleccionar un plano donde realizar el corte, seleccionar la cara frontal donde se realizaran dichos agujeros, así mismo, el siguiente paso será seleccionar un eje o línea que se desee que aparezca, que puede ser cualquiera de los bordes del eje. Crear una circunferencia con centro en la coordenada (0, 0.0575) y radio 8 mm, posteriormente, mediante la herramienta **Radial Pattern**  seleccionar dicha circunferencia, entonces aparecerá una ventana emergente que permite definir el número de copias y el ángulo total que formará el patrón, 4 de 360°. Pulsar **Ok** y **Done**.

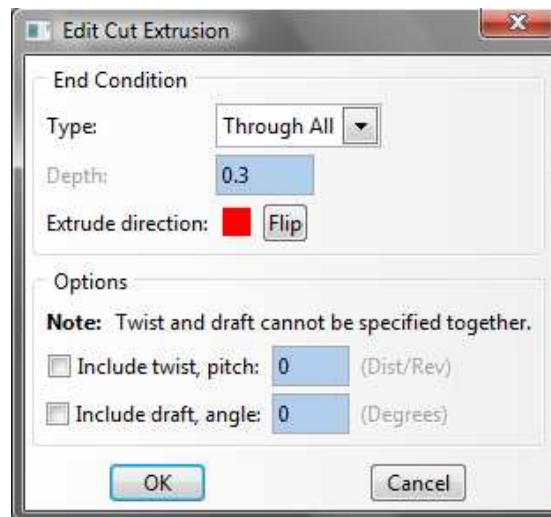


Fig. 39 – Ventana edición final vaciado.

Aparecerá la ventana emergente de la Figura 39, **Edit Cut Extrusion**. En ella se debe elegir el tipo de extrusión, Blind, para poder darle una profundidad de 0.04 m y el sentido del corte será hacia el interior del eje. Los taladros se realizan en los dos extremos del eje, por lo que habrá que repetir esta operación en el otro extremo. El detalle de los talados se muestra en la figura inferior, figura 40.

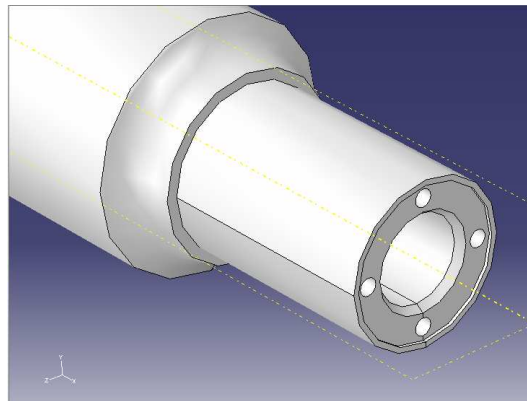



Fig. 40 – Aspecto taladros laterales.

5.1.3. PROPIEDADES DEL MATERIAL

La definición de las propiedades mecánicas del material así como la asignación de dicho material a la pieza deseada se realiza a través del módulo Property. Para ello se realizarán dos acciones, la definición de los datos a partir de los datos de la tabla 1 y la tabla 2 y posteriormente la asignación de dicho material a la pieza.

Definir material

Se comienza creando un material denominado Acero con propiedades elásticas, plásticas y que permita la generación y propagación de fallos mecánicos. Para ello se comienza seleccionando en el **Model tree** → **Materials**, o a partir de **Property** desde el desplegable de **Model** y seleccionar la opción **Create Materials** en el menú **Materials** o seleccionar el siguiente botón .

Aparece la ventana emergente de la Figura 41, donde se procede a definir las propiedades del material:

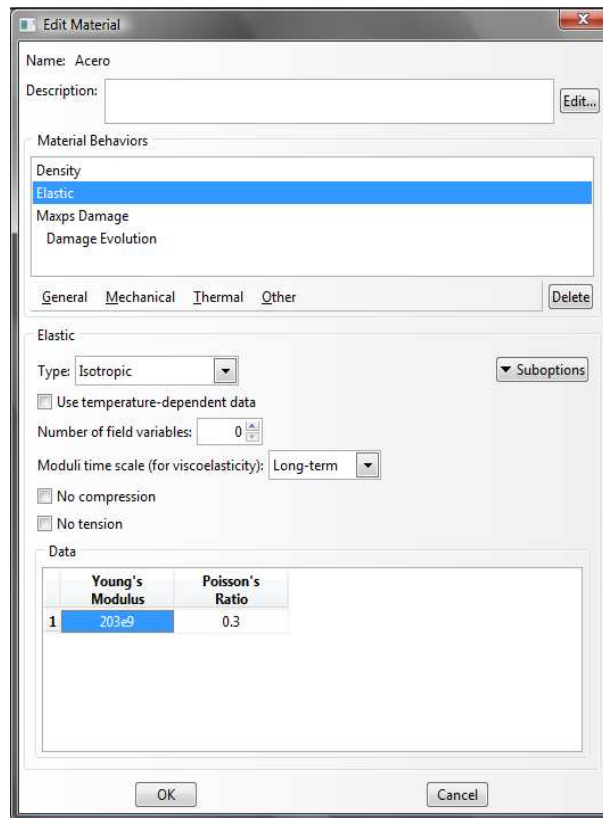


Fig. 41 – Ventana Edit Material.

Escribir el nombre del material para tenerlo identificado: **Acero**.

De la barra de menú desplegar **General** y seleccionar **Density**. Esta propiedad será necesaria cuando se trabaje con fuerzas gravitatorias, introducir **8750**.

Desplegar la barra **Mechanical** desplegar **Elasticity** y seleccionar **Elastic**. Introducir el Modulo de Young **209e9** y un Coeficiente de Poisson **0.3**, elegir propiedades isotrópicas en **Type**.

Se introducen propiedades plásticas para obtener valores de propagación de grieta adecuados y verosímiles, por lo que se despliega **Mechanical** -> **Plasticity**->**Plastic**. Se introducen propiedades plásticas isotrópicas, **Hardening isotropic**, y se detallan los datos de tensión y deformación de la tabla 2.

Es necesario introducir las propiedades de daño del material, en este caso se introducen valores para permitir la fractura, su inicio y evolución. Para ello, desplegar la barra **Mechanical**, desplegar **Damage for Traction Separation Law** y seleccionar **Maxps Damage**. Introducir el valor para la tensión máxima **3.5e8**.



Para facilitar la evolución de la fractura desplegar Suboptions y seleccionar **Damage Evolution**. Introducir los valores para **Type: Linear**, en **Mixed mode behavior: Power Law** y **Power: 1**. Introducir los valores para la tabla de **4e4**.

Estas opciones y valores se han elegido debido a que la evolución del daño se desea realizar a través de la energía de fractura tras su iniciación que es un dato.

Creación de la sección y asignación del material

Crear una sección es realmente la forma de asignar a una pieza o Part las propiedades del material y su comportamiento, puesto que una o varias piezas pueden tener una o varias propiedades distintas.

Desplegar del menú **Section** → **Create** o seleccionar el botón Create Section que aparece en la figura 42, elegir **Category: Solid**, **Type: Homogeneous** y pinchar en **Continue...** Aparecerá una nueva ventana, seleccionar del desplegable, aunque aparecerá por defecto, el material creado: Acero.

Desplegar **Assign** y seleccionar **Section**, pinchar en una superficie cualquiera del eje, que al ser una única pieza, será seleccionado completamente. Aparecerá una ventana donde se pueden leer las propiedades asignadas del part una vez seleccionado la sección deseada desde el desplegable.

Se puede apreciar un cambio de color en el eje. Esto es debido a que ABAQUS indica de esta forma que la pieza ya tiene unas propiedades definidas y asignadas.

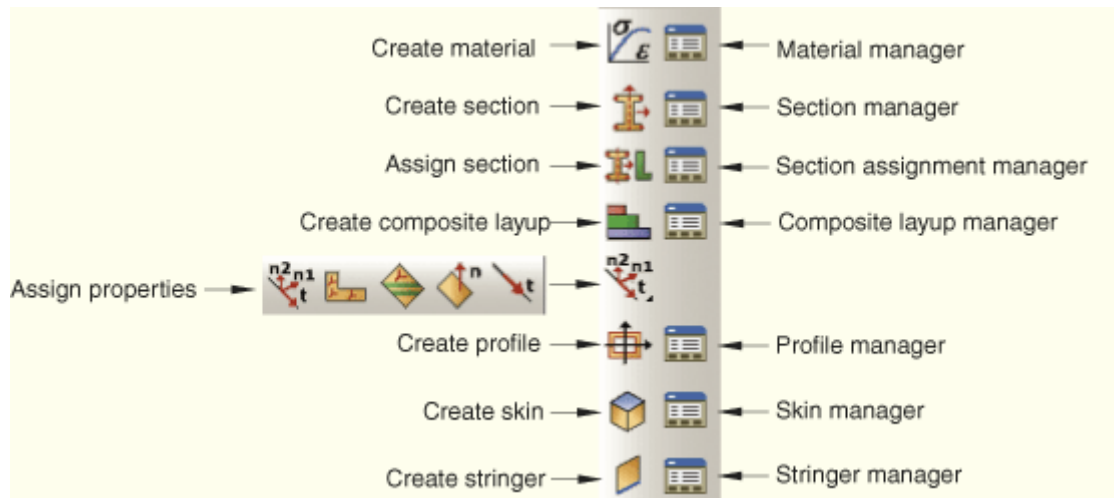


Fig. 42 – Herramientas del menú Property.

5.1.4. MONTAJE Y MALLADO

Montaje

Es necesario crear un Instante de la pieza para poder realizar cualquier análisis, en este caso se ha elegido una instante dependiente debido a que se trata de una única pieza y no se desea generar un archivo de gran memoria. Para ello, en **Module** desplegar **Assembly** o desde el árbol de herramientas seleccionar **Assembly** directamente. Desplegar **Instance** → **Create** Seleccionar **eje** y en instance tipo **Dependent**.

Mallado

Para los estudios a realizar se requiere un mallado que se ajuste a la geometría de revolución del eje y no excesivamente fina puesto que aumenta excesivamente el tiempo requerido para el cálculo.

Al haber decidido que fuese una pieza dependiente, el mallado se realiza directamente sobre el part eje creado, por ello, seleccionar del árbol de menú **Part**→**eje**→**Mesh** para entrar en el módulo de mallado.

ABAQUS genera unos valores por defecto para el mallado basándose en la

geometría diseñada, el elemento generado será del tipo C3D4, es decir, un elemento tetraédrico lineal.

Desde la barra de menú seleccionar **Seed** → **Part** para adjudicar el tamaño aproximado del grano a la malla, como aparece en la figura 43 y dejar los valores por defecto.

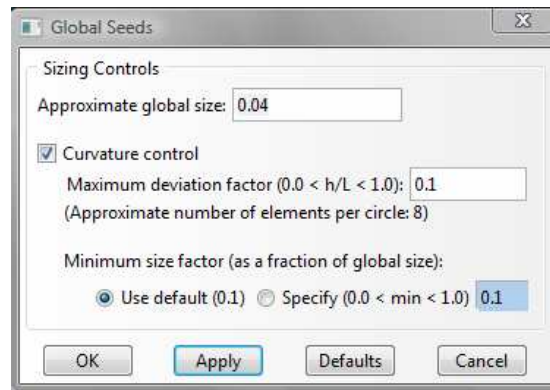


Fig. 43 – Ventana tamaño de grano.

Seguir con el proceso y desde **Mesh** → **Controls...** seleccionar **Tet** para obtener un mallado tetraédrico y dejar las demás opciones por defecto para facilitar dicho mallado.

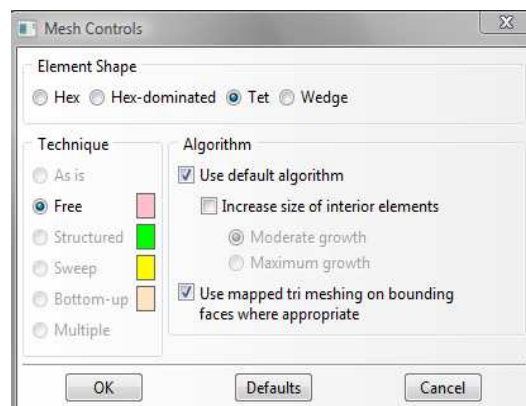


Fig. 44 – Ventana elección tipo de malla.

Una vez confirmados los valores, se procede a mallar todo el eje de un vez a partir de la opción **Mesh** → **Part...** al ser valores predeterminados por el propio software, los conflictos entre nodos se simplifican al máximo. El aspecto final del eje una vez mallado se puede observar en la figura 45.

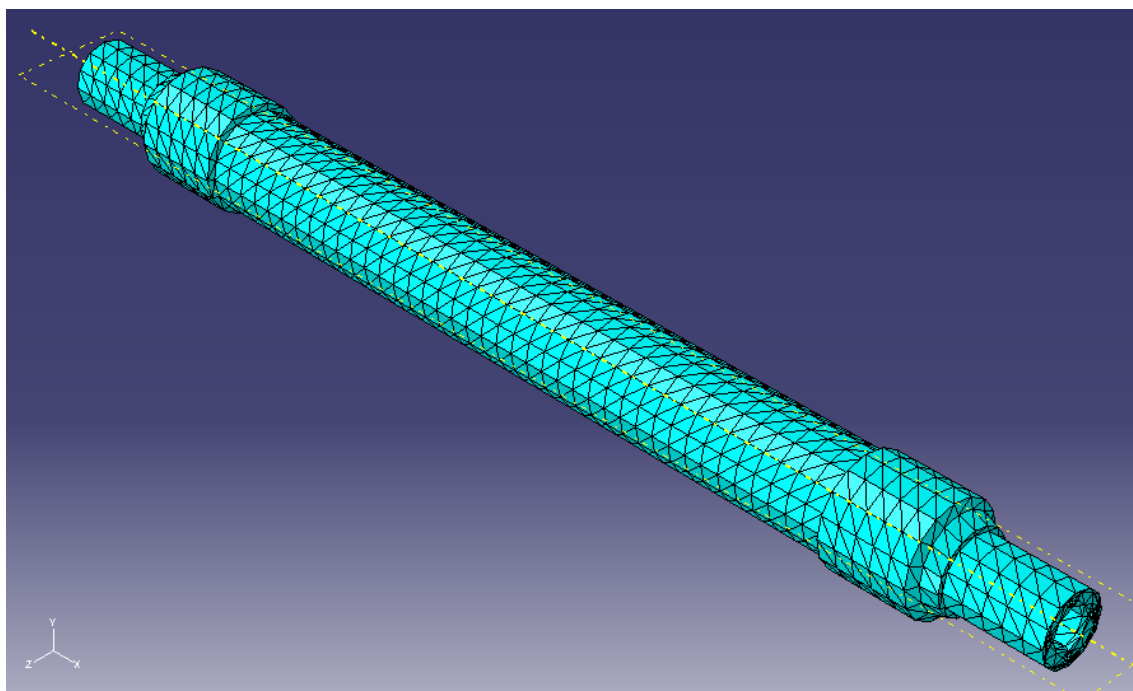


Fig.45 – Eje mallado.

5.2. ESTUDIO ESTÁTICO DE EJE EN ABAQUS

Para llevar a cabo el estudio a estático, se fijarán las restricciones de movimiento y se introducirían diferentes cargas simulando así las distintas cargas de los vagones sobre el eje.

5.2.1. MODELO DE ESTUDIO

El estudio a realizar será un modelo de estudio estático, el cual se realizará a través de un único Step que recoja las cargas, restricciones y tensiones principales. Para ello, es necesario ir al módulo Step y una vez dentro del menú **Step**→**Create...** Introducir el nombre que se desee y seleccionar **Static, General** que es el step más efectivo para realizar un estudio a cargas estáticas.

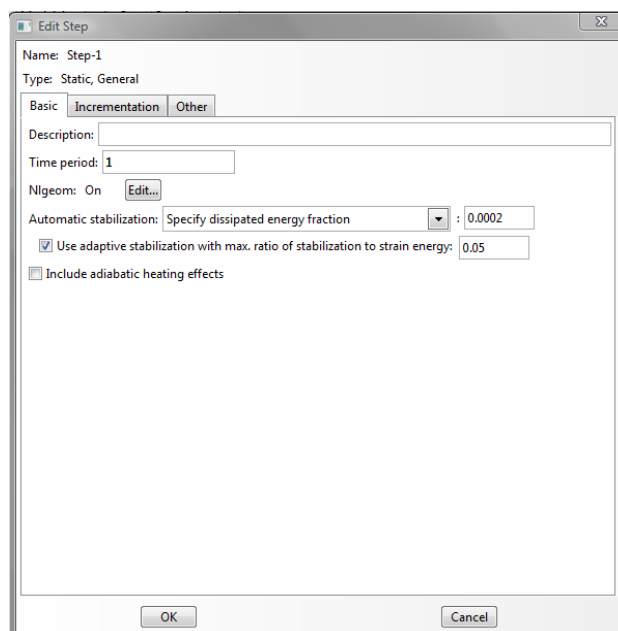


Fig. 46 – Ventana edición Step.

Posteriormente aparecerá el editor de Step, ver figura 46, donde se introducen los valores para un estudio eficiente. Al tratarse de un estudio estático, el **Time period**, tiempo

de estudio, no necesita más que 1 segundo para calcularse. Se activa la opción **Nlgeom** para grandes desplazamientos y deformaciones en el eje sometido a estudio y se activa la estabilización automática puesto que en estudios posteriores será necesaria.

Se pasa a la pestaña **Incrementation** donde se da valor a la incrementación, en este caso no es necesario un estudio en profundidad por lo que los valores de inicio y final del incremento se modifican a 0.1 y el valor mínimo se respeta 10^{-5} .

5.2.2. RESTRICCIONES

Las restricciones de movimiento se aplican en las superficies del eje que están en contacto con las ruedas en la realidad.

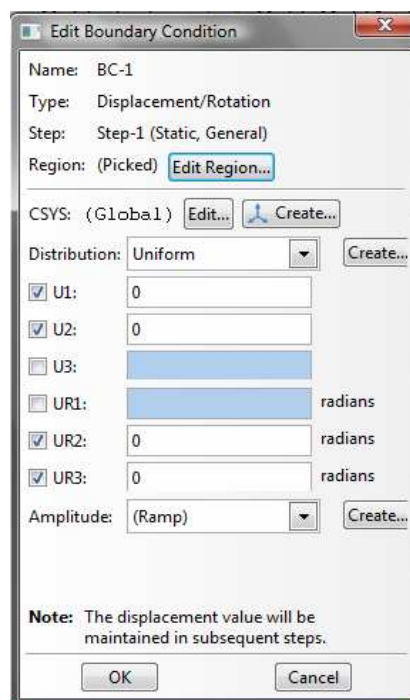


Figura 47 – Ventana condiciones de contorno.

Para poder realizar estas restricciones se debe ir al módulo de cargas o Load y desde el menú **BC -> Create** seleccionar para el Step anteriormente creado, la opción de **Displacement/Rotation** de la categoría de condiciones de contorno mecánicas. Aparecerá la ventana de edición de condiciones de contorno, figura 47, en la que se seleccionarán los

grados de libertad a restringir igualándolos a cero, U1, U2, UR2 y UR3, dejando libres los otros dos, giro y desplazamiento del eje. Posteriormente se seleccionará la región donde se aplica, es decir, la superficie de contacto con la rueda tal y como se observa en la figura 48.

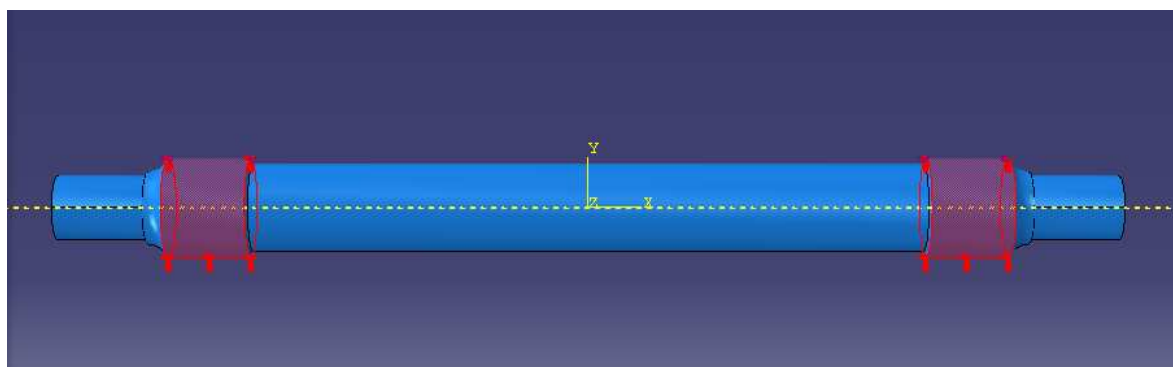


Fig. 48 – Aplicación restricciones.

5.2.3. CARGAS

Las solicitaciones a las que se va a ver envuelto el eje ferroviario se definen como cargas aplicadas sobre los extremos además de su propio peso. Se aplicarán como presiones e modificándose y aumentando progresivamente como se describe en la tabla 5.

Tabla 5 – Cargas aplicadas y presiones en superficie.

Nombre de Carga	Peso sobre el eje (kN)	Carga por apoyo (kN)	Presión (MPa)
Carga 1	100	50	1,6
Carga 2	200	100	3,2
Carga 3	300	150	4,8
Carga 4	400	200	6,4
Carga 5	500	250	8
Carga 6	600	300	9,5
Carga 7	700	350	11,1
Carga 8	800	400	12,7
Carga 9	900	450	14,3
Carga 10	1000	500	15,8

La primera carga a definir es la gravedad, desde el módulo Load seleccionar en la barra de menú **Load->Create...** Aparecen las posibles cargas a estudio, seleccionar **Gravity** de la categoría mecánica e introducir el valor de la aceleración gravitatoria -9.8 m/s^2 en la componente 2 que corresponde con el eje Y. La región sobre la que se introduce la aceleración es el eje completo y a partir de entonces el software calculará las fuerzas y tensiones derivadas de la gravedad.

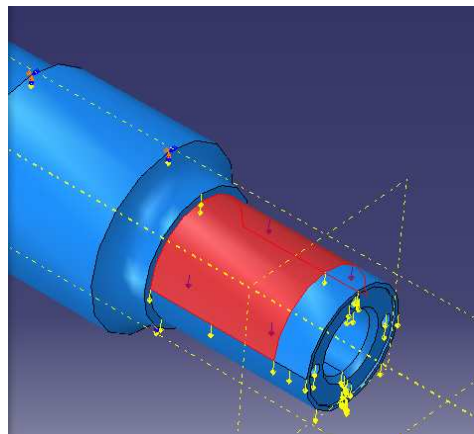


Fig. 49 – Superficie aplicación de carga.

Para la implantación de la carga derivada del peso que el vagón ejerce sobre el eje, se selecciona una carga que ejerza una presión sobre la superficie en voladizo en los extremos del eje. En este caso se ha decidido implantar un tipo de carga denominada **Surface traction**, exactamente en la superficie superior de los citados voladizos y sin extenderse hasta la parte perforada por los taladros, figura 49, con la misma dirección y sentido que la gravedad, por lo que el vector de dirección sigue las coordenadas (0,0,0) a (0,-1,0). Las magnitudes de esta carga se introducen en Pascales y son las que aparecen en la tabla 5.

En la figura 50 puede observarse como quedan las cargas y restricciones aplicadas al eje para el estudio estático.

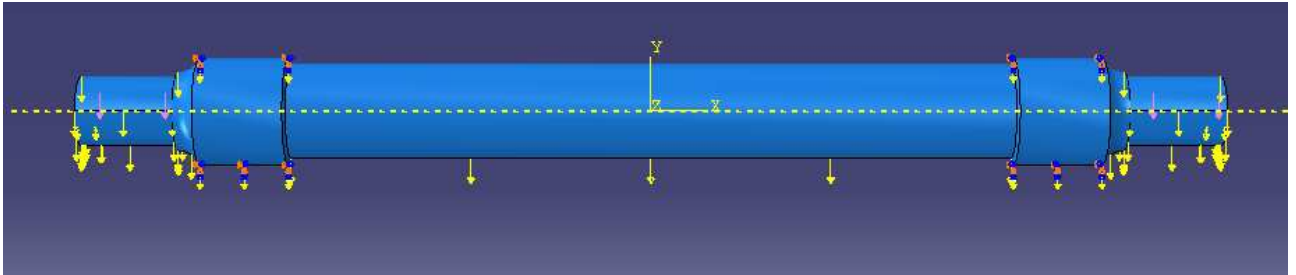


Fig. 50 – Cargas y restricciones definitivas sobre el eje.

5.2.4. ANÁLISIS

El estudio estático del eje ferroviario comenzará una vez que se le dé la instrucción al trabajo creado, **Job**, mediante la operación de **Submit**. Esta opción permite el cálculo de las tensiones y deformaciones a las que se ha visto sometido bajo las diferentes cargas aplicadas.

Para obtener los resultados y visualizarlos en la pantalla, ir al módulo **Visualization** o **Job->Results**, esta segunda opción es bastante más efectiva ya que entrega la salida del trabajo especificado y con los últimos cálculos realizados en él.

5.3. ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE GRIETA EN ABAQUS

El estudio de propagación de grieta se va a realizar mediante el método de modelización en XFEM (eXtended Finite Element Method).

5.3.1. DEFINIR GRIETA

Para poder generar y propagar la grieta, es necesario definirla, desde el módulo **Interaction**, en menú **Special**→**Crack...**→**Create** seleccionar el tipo **XFEM** y seleccionar el eje completo permitiendo el crecimiento de grieta sin necesidad de definir el frente de grieta.

Una vez definida la grieta es necesario definir la interacción en la que será usada, **Interaction**→**Create....** y seleccionar **XFEM crack grown**, opción a definir en el Step inicial.

5.3.2. CARGAS Y RESTRICCIONES

Las restricciones del eje para el estudio de propagación de grieta, serán las mismas condiciones de contorno asignada para el estudio de las tensiones y deformaciones a estático, es decir, se impide el movimiento en los ejes X e Y y el giro en los ejes Y y Z.

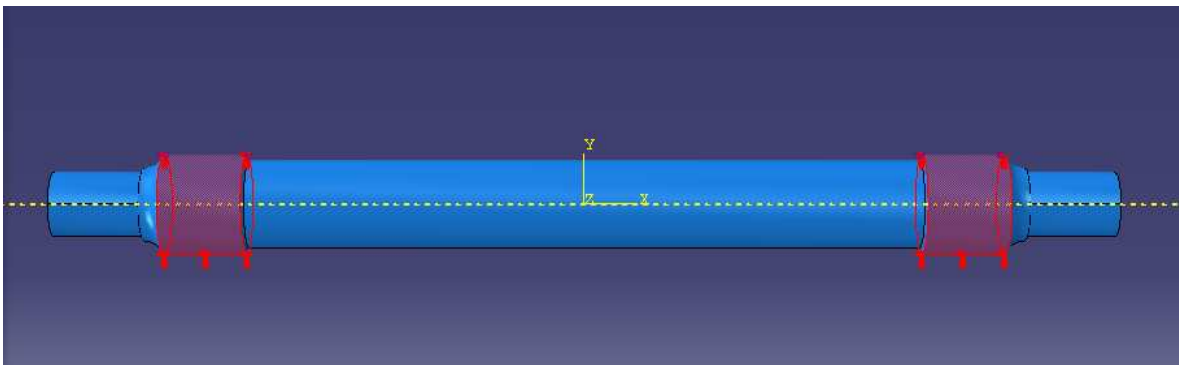


Fig. 51 – Aplicación de las restricciones.

Las cargas se aplican en los extremos en voladizo del eje tal y como se implantaron en el estudio a estático y se introduce de forma creciente. Para permitir una propagación de grieta rápida el valor de tales cargas superarán la resistencia a rotura del material. También se introduce el valor de la aceleración de la gravedad sobre el eje.

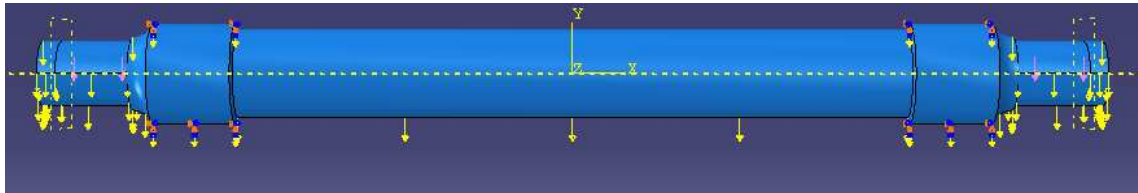


Fig. 52 – Cargas aplicadas para el estudio de propagación de grieta.

5.3.3. MODELO DE ESTUDIO

El Step definido es el mismo que el del estudio anterior, sin embargo, se le introducen cambios en el incremento reduciendo sus valores para ayudar a la convergencia del análisis introduciendo los siguientes valores:

- Máximo número de incrementos será 1000
- Incremento inicial 0.01
- Mínimo incremento posible es de 10^{-9}
- Máximo incremento posible es 0.1

Para permitir valores tan pequeños en la iteración que permita la convergencia del análisis, se debe variar la cantidad de iteraciones por incremento. Para ello, desde módulo Step, **Other**→**General Solutions**→**Controls**→**Edit** y seleccionar el Step de cálculo, especificar en la pestaña **Time Incrementation** un $I_A = 20$.

5.3.4. SALIDAS

Es necesario seleccionar dos salidas que permitan observar los resultados de la fractura en el modelo, PHILSM y STATUSXFEM. Estas opciones que se hallan en **Field**



Output Requests y permiten visualizar la acumulación de energía de rotura y el estado de XFEM en los elementos respectivamente.

5.3.5. ANÁLISIS

Una vez realizado el estudio de propagación de grieta, se pasa a observar los resultados de forma gráfica. Cuando se supera la tensión de rotura y empieza a propagarse la grieta, el programa empieza a realizar una convergencia de los resultados, por lo que aumenta las iteraciones y disminuye el tiempo de los incrementos para favorecer dicha creación y propagación de la grieta.



5.4. ESTUDIO DE EJE FISURADO EN ABAQUS

Una vez obtenidos los resultados para el inicio y propagación de grieta a través del método XFEM, se procede a realizar el mismo estudio pero esta vez con la grieta ya generada. Para ello se van a realizar diferentes tipos de grieta que se posicionarán en 5 zonas distintas y a tres profundidades simulando el avance de grieta para posteriormente aplicar el análisis XFEM.

5.4.1. POSICIONAMIENTO Y GEOMETRÍA DE LA GRIETA.

Para comenzar con la generación de las diferentes grietas que se van a realizar se deben crear planos de referencia perpendiculares al plano de la directriz en las posiciones que se detallan en la figura 53.

Desde el módulo **Part**, en el menú **Tools** → **Datum...** seleccionar la opción de crear plano y el método para la creación de dicho plano será a través de otro plano ya existente y que acabará siendo paralelo, **Offset from plane**. Seleccionar un plano perpendicular a la directriz del eje o superficie perpendicular, elegir entre distancia o punto de referencia para colocar el nuevo plano. Debido a la geometría de dicho eje, la selección de puntos será la recomendada para los planos 2, 3 y 5, para los planos 1 y 4 se introducirá la distancia existente desde el extremo, plano de referencia, hasta dicha posición.

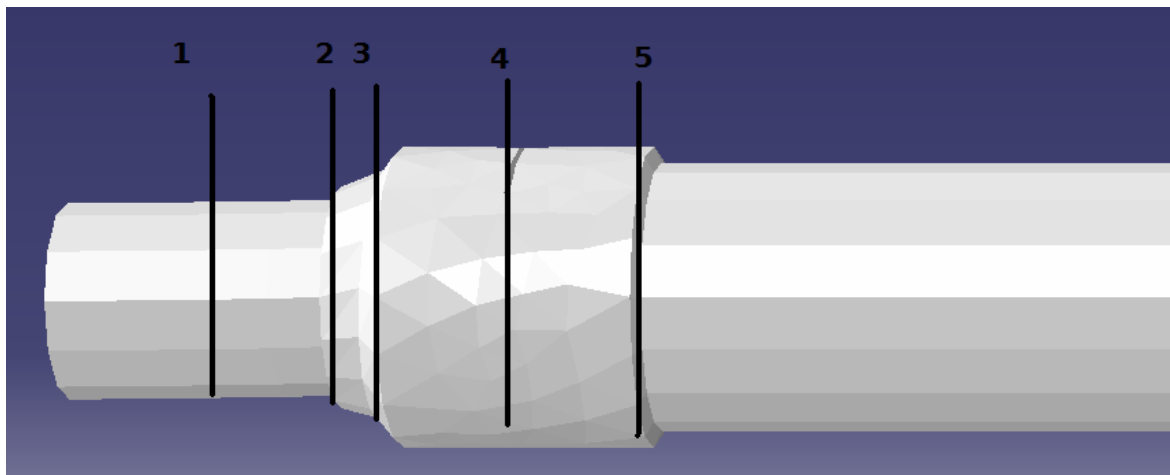


Fig. 53 – Posición de las grietas.

Obtenidos los 5 planos de referencia, se procede a generar las grietas que en ellos se van a situar. El frente de las grietas es radial para simular lo mejor posible la fractura de materiales bajo cargas y será proporcional a cada diferencia de diámetro y en tres posiciones diferentes.

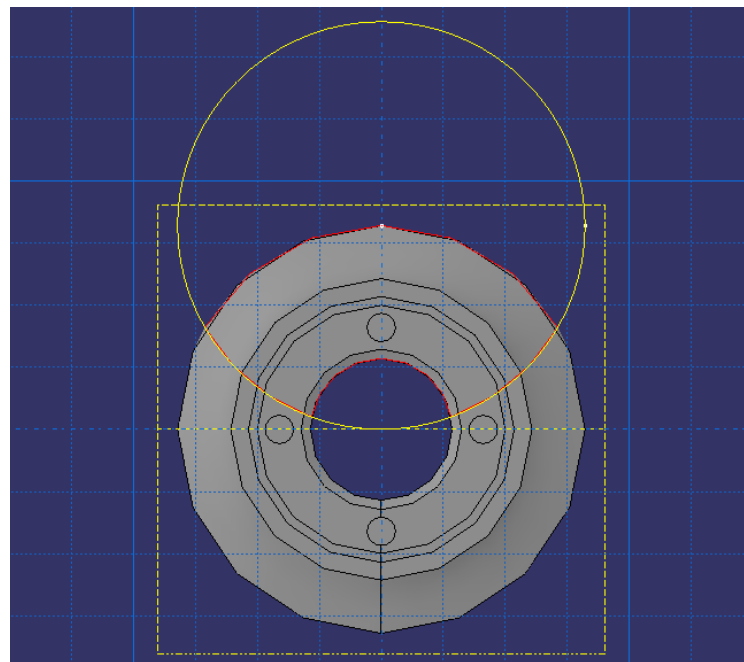


Fig. 54 – Boceto de la generación de grieta en la posición 4.

La fisura se genera a través del módulo **Part**, desde el menú **Shape -> Cut -> Extrude** se selecciona el plano donde se realizará dicha extrusión y otro plano paralelo usado como referencia. Se genera una circunferencia de radio igual al radio de la sección del eje que se está fisurando para que dichas áreas sean proporcionales tal y como se observa en la **figura** y se posicionará a través de la opción **Translate** el frente de la grieta. Dichas posiciones corresponden a frente de grieta total, frente de grieta en superficie hueca y frente de grieta a 50% de profundidad tal y como se puede ver en la Tabla 6.

Una vez dibujado el círculo que formará la fisura, la ventana de edición del corte permite elegir cómo se realiza el vaciado, en este caso será **Blind** y con una profundidad de 0,004 (fisura de 4mm de espesor), la dirección es posible cambiarla a través de la opción **Flip**.

Tabla 6 – Posición del frente de grieta para cada fisura.

Fisura	Posición	Posición grieta en el eje Y (mm)
1	Grieta Total	0
	Grieta en hueco	40
	Grieta al 50%	77,5
2	Grieta Total	0
	Grieta en hueco	40
	Grieta al 50%	77,5
3	Grieta Total	0
	Grieta en hueco	40
	Grieta al 50%	75
4	Grieta Total	0
	Grieta en hueco	40
	Grieta al 50%	62,5
5	Grieta Total	0
	Grieta en hueco	40
	Grieta al 50%	57,5

A continuación se observa en la figura 55, el detalle de una fisura diseñada por el usuario en el software.

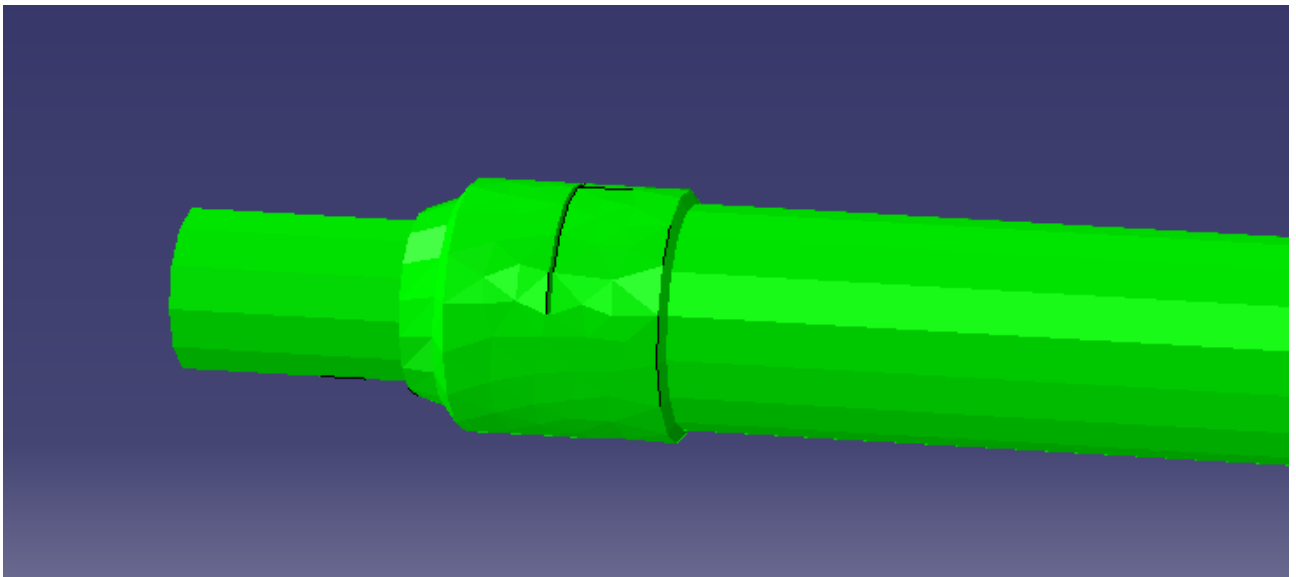


Fig. 55 – Detalle de la grieta diseñada.

5.4.2. RESTRICCIONES Y CARGAS

Las restricciones del eje para el estudio de propagación de grieta, serán las mismas condiciones de contorno asignada para los estudios anteriores, es decir, se impide el movimiento en los ejes X e Y y el giro en los ejes Y y Z.

Las cargas se aplican como en análisis anteriores, en los extremos en voladizo del eje. Para permitir una propagación de grieta rápida el valor de tales cargas superarán la resistencia a rotura del material. También se introduce el valor de la aceleración de la gravedad sobre el eje.

5.4.3. ANÁLISIS

El análisis se realiza a través de un modelo estático en el que se ha introducido el estudio de propagación XFEM para todo el eje



6. RESULTADOS

6.1. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO ESTÁTICO

Una vez analizados los diez casos, se obtiene que los valores máximos de tensión se concentran en los cambios de sección, especialmente en los que dichos cambios son bruscos, lo que gráficamente se puede observar en la figura 56, que corresponde con el primer cambio de sección.

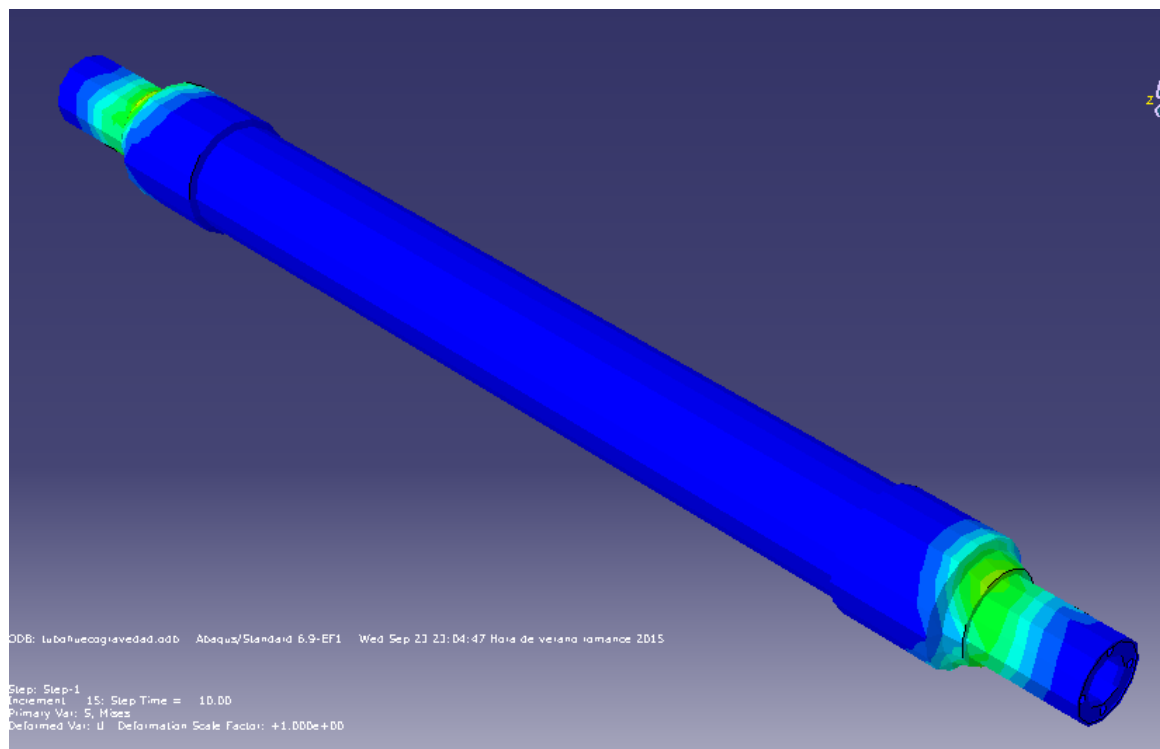


Fig. 56 – Distribución de tensiones Von Misses de la carga 5.

Observando un detalle de la sección del extremo del eje, figura 57, se obtiene que la zona donde mayor son las tensiones se introduce en el eje en vez de situarse en la superficie, esto es debido a la forma geométrica del mallado realizado, que aunque hace un calculo fiable, al representarlo lo deforma.

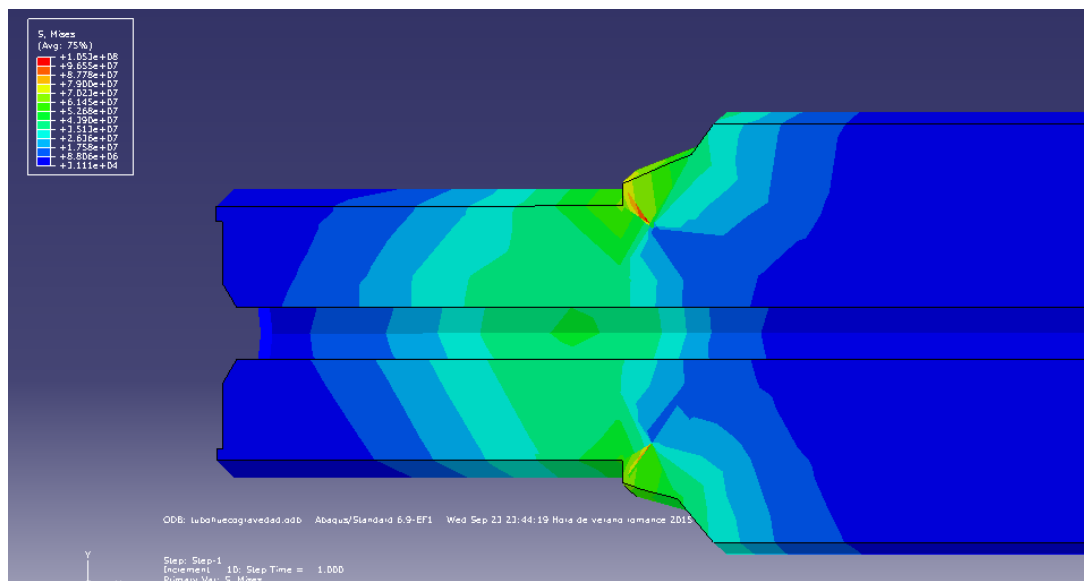


Fig. 57 – Detalle de la tensión de Von Misses en un corte longitudinal de la carga 5.

En cuanto a las deformaciones máximas, éstas se obtienen en los extremos del eje ferroviario, algo trivial al estar las cargas aplicadas en dicha zona y mantenerse en voladizo como se representa en la Figura 58.

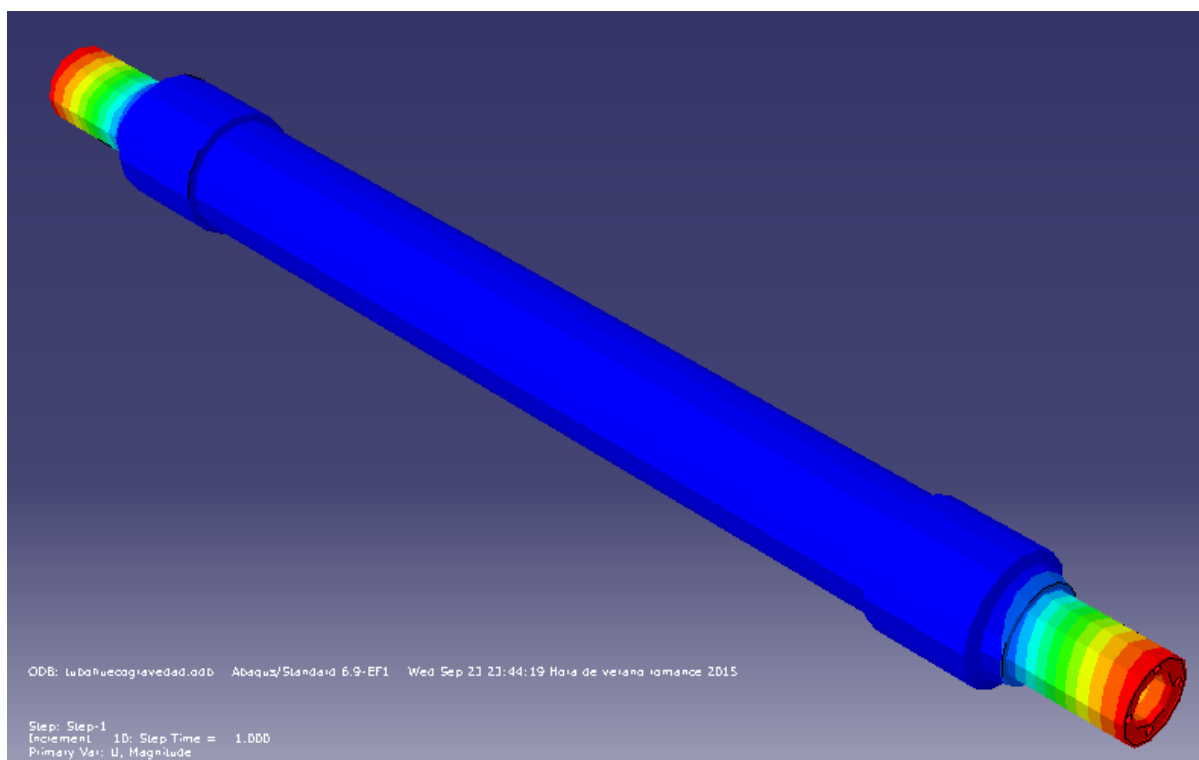


Fig. 58 – Desplazamientos en Carga 5.

En la siguiente imagen, la figura 59, se observa el desplazamiento máximo que sufre el eje con la Carga 5, aproximadamente 0,13 mm en la zona de máxima deformación, un valor pequeño y por lo tanto aceptable para ese régimen.

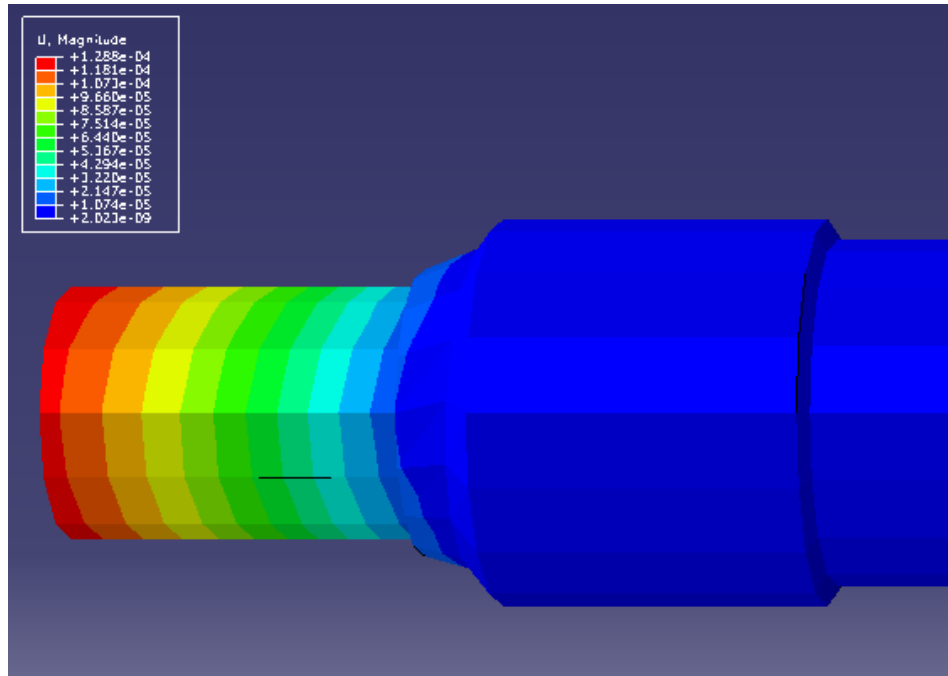


Fig. 59 – Detalle desplazamiento Carga 5.

A continuación se expresan en la tabla 5 los valores de tensiones y deformaciones máximas a las que ha sido sometido el eje ferroviario debido a cada carga y como se puede observar, para la mayor carga, la carga 10 de 500 kN por voladizo, es decir, que cada extremo del eje soporta una masa de 50 toneladas, masa muy poco probable; en dicho análisis la tensión no llega a la tensión de fluencia, por lo que el eje trabaja siempre en estado elástico y recuperará su posición.

Tabla 7 – Resultado de las tensiones y deformaciones en el análisis estático.

Nombre de Carga	Tensiones (MPa)	Deformaciones (mm)
Carga 1	21,14	0,0258
Carga 2	42,2	0,0516
Carga 3	63,24	0,077
Carga 4	84,28	0,1013
Carga 5	105,3	0,13
Carga 6	125,1	0,153
Carga 7	146,1	0,179
Carga 8	167,1	0,204
Carga 9	188,2	0,23
Carga 10	207,9	0,254

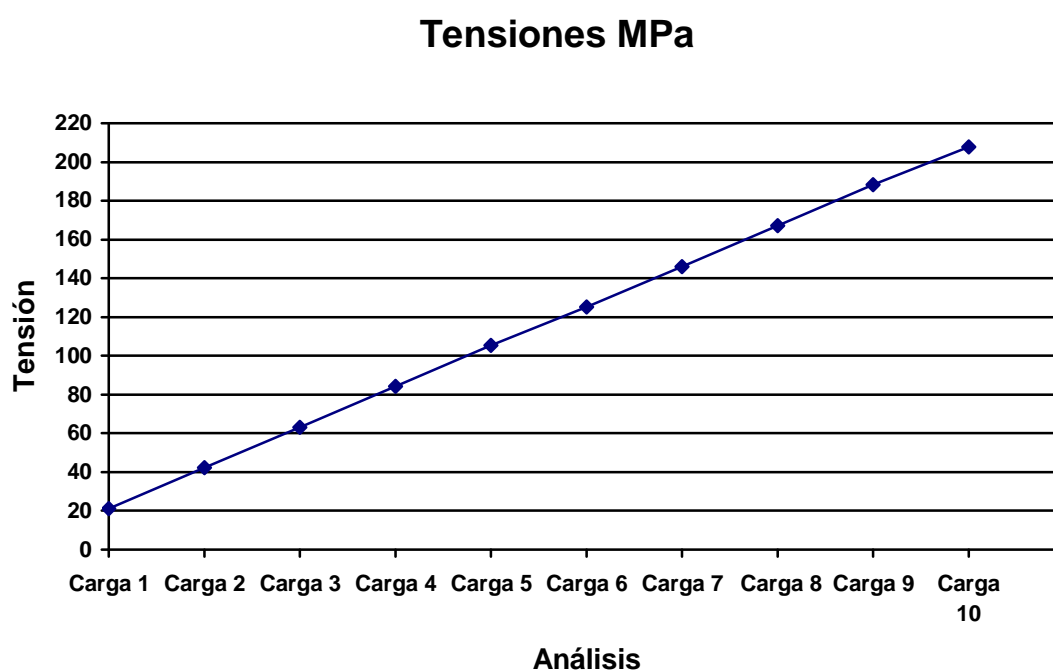


Fig. 60 – Tensión máxima en estudio estático.

La gráfica tensión/carga representada en la figura 60, mantiene una linealidad constante para todos los análisis realizados, confirmando que las tensiones en el eje son proporcionales a las cargas aplicadas.

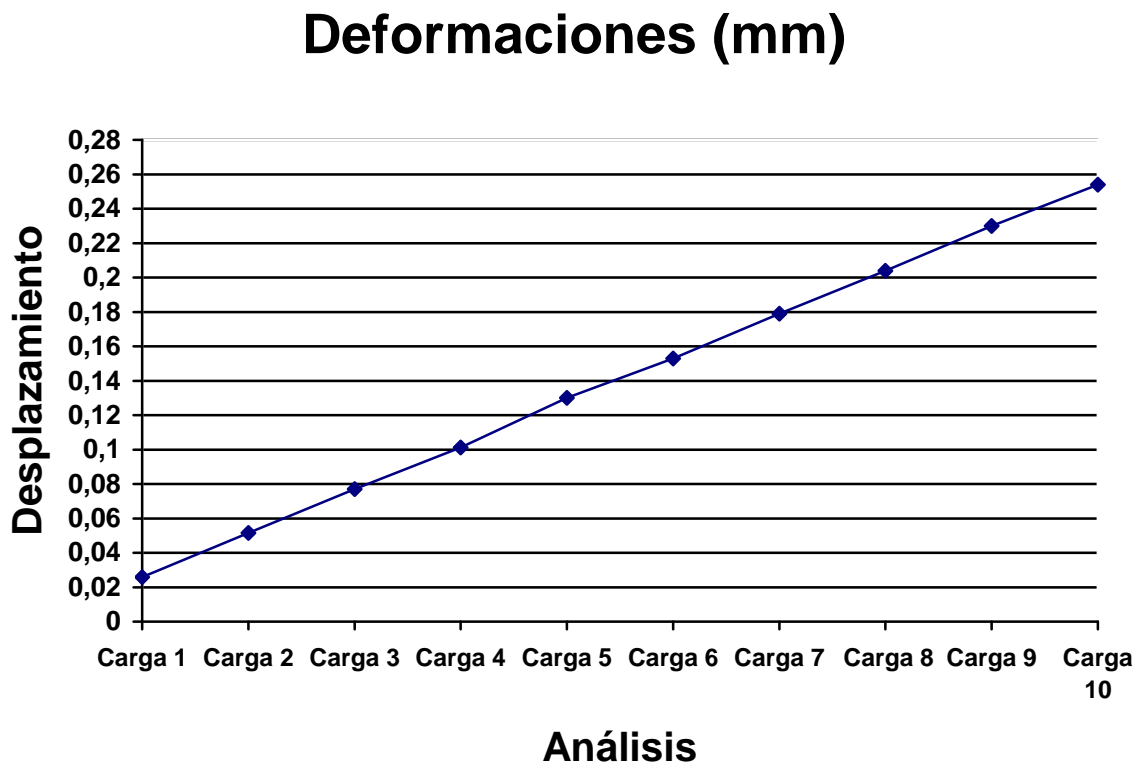


Fig. 61 – Deformaciones máximas en estudio estático.

Se puede apreciar en la figura 61 que las deformaciones crecen de forma lineal y proporcional a las cargas ejercidas sobre los voladizos, síntoma de estar trabajando en régimen elástico.

6.2. RESULTADOS DE LA PROPAGACIÓN DE GRIETA

Tras ejercer la carga sobre los voladizos como en el estudio anterior, esta vez sobredimensionada para que ya no sólo trabaje el eje en régimen elástico, sino que fracture, como se puede observar en la Figura 62, el inicio de la grieta corresponde con la zona de tensión máxima, cambio brusco de sección.

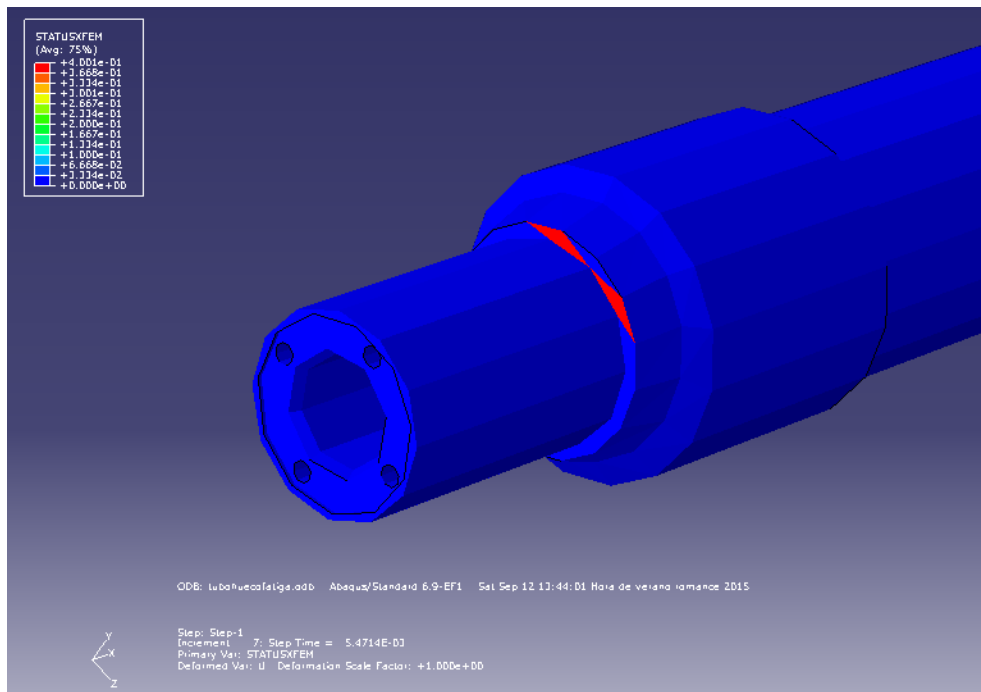


Fig. 62 – Inicio de Fractura.

Tras 0,02 segundos, aparece la fractura y el método XFEM permite la evolución de la grieta por la superficie del eje de forma vertiginosa como se observa en la figura 63, propagándose por uno de los extremos, ya que como se explicó, este proceso sólo permite el estudio y propagación de una fisura por estudio.

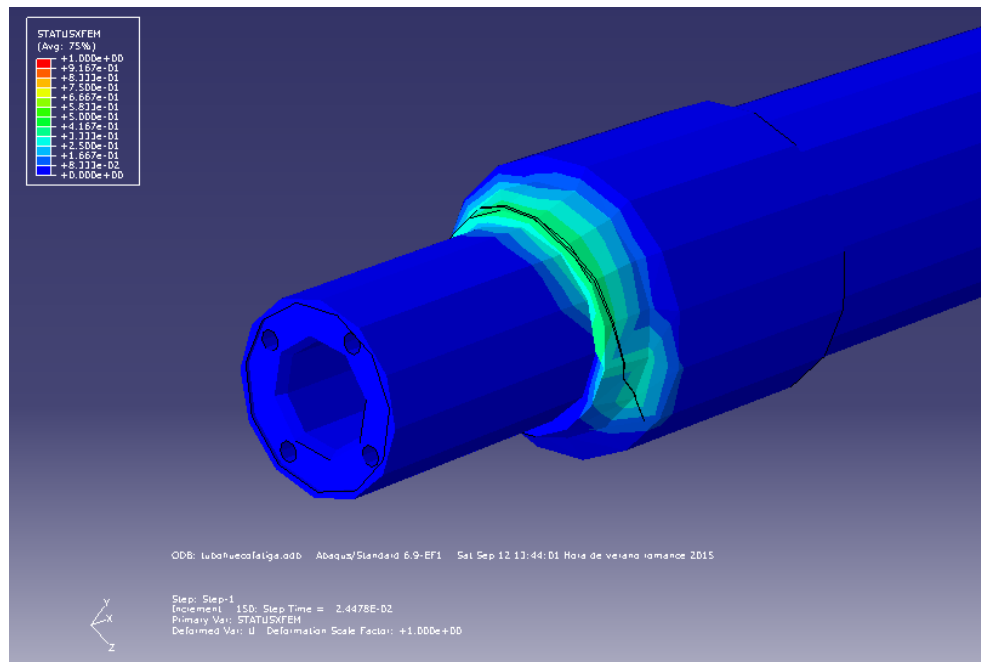


Fig. 63 – Grieta propagada.

En cuanto a las tensiones, en la gráfica tensión frente al tiempo, se observa que la tensión máxima aumenta de forma lineal a lo largo del tiempo que corresponde con la tensión elástica hasta cierto momento en el que se produce una variación en torno a los 0,06 segundos. Posteriormente, se produce la caída brusca de la pendiente que corresponde a la rotura del elemento XFEM. Teóricamente, esta curva debería caer hasta un valor nulo, sin embargo, al haberle asignado propiedades plásticas y redistribuirse las cargas por los elementos finitos contiguos al fisurado, sigue propagándose hasta otra caída de tensión aumentando así el frente de grieta.

No se observa una caída brusca en la tensión debido a que el elemento no ha conseguido fisurar completamente.

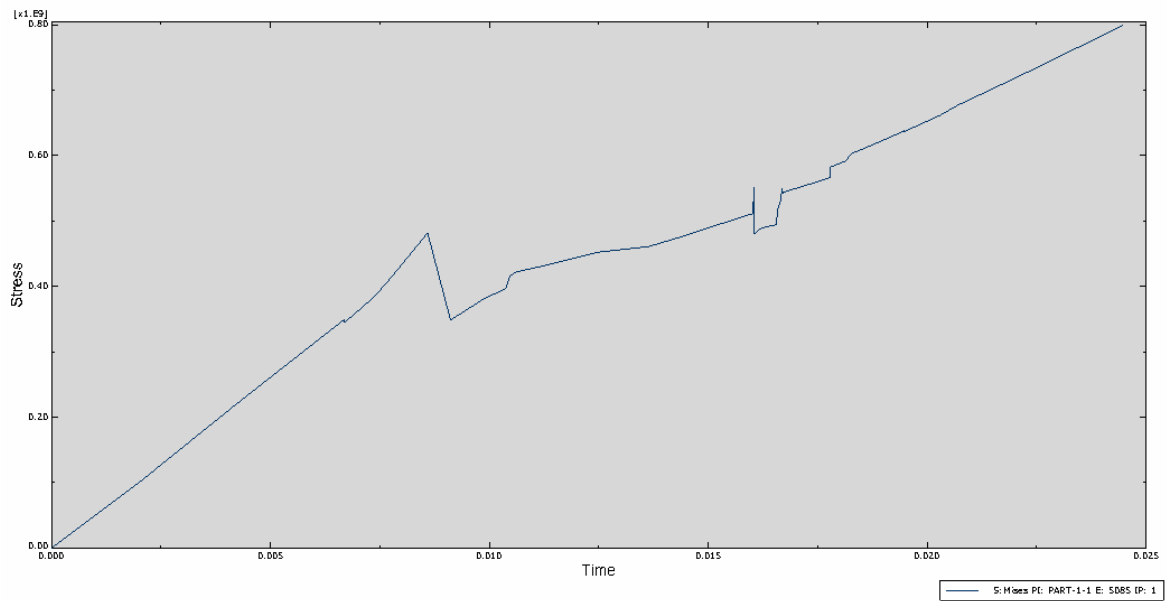


Fig. 64 – Propagación de tensión.

En cuanto a las deformaciones plásticas frente al tiempo que se observan en la figura 65, éstas corresponden al cambio de pendiente generado entre el final de la tensión elástica y la fractura del material en la gráfica de Tensión-Tiempo.

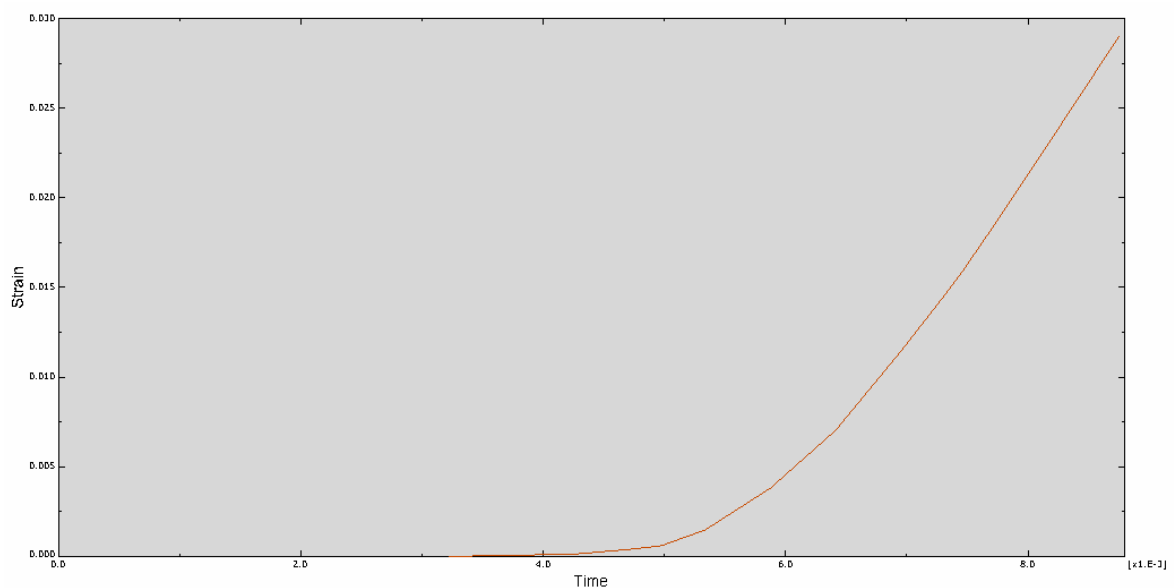


Fig. 65 – Deformación

6.3. RESULTADOS DEL EJE FISURADO

A continuación se reflejan los valores obtenidos para el cálculo del eje fisurado en cinco zonas diferentes y a tres profundidades distintas.

Se ilustrarán las tensiones y propagaciones de grieta más relevantes por cada estudio realizado y posteriormente se analizarán los datos obtenidos.

6.3.1. EJE CON FISURA EN ZONA 1

Tensión máxima

La tensión máxima hasta que se genera el inicio y propagación de grieta por el método XFEM es de 346 MPa algo inferior al límite de rotura, sin embargo, esto es debido a que se ha favorecido la fractura dando un factor de convergencia alto, por lo que se toma esta diferencia de tensiones como un error de convergencia mínimo, incluso despreciable. Además, dicha tensión se da para el estudio de fisura 1.1 en dos zonas, la fisura y la zona crítica (datos se aportan en la tabla 8), aunque la fractura no se genera en las dos zonas.

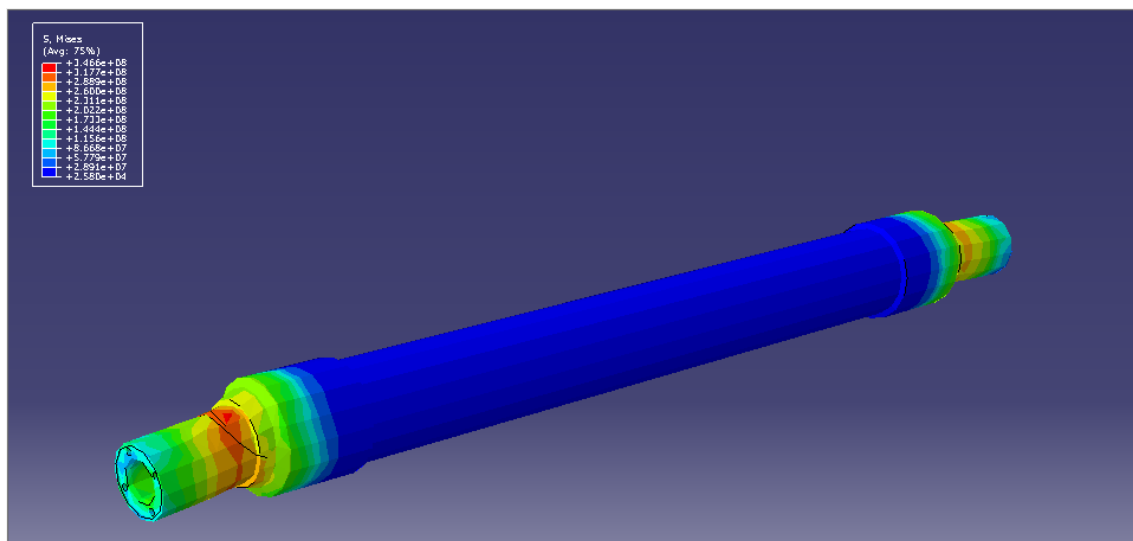


Fig. 66 – Tensión máxima para eje con fisura en zona 1. Estudio 1.1

Grieta

En la figura 67 se aprecia perfectamente como la grieta, a través de la salida PHILSH, se genera en la fisura creada y se va extendiendo. Lo importante de esta imagen no es observar la dirección de propagación de la fisura, puesto que las cargas en la grieta se redistribuyen por los nodos adyacentes y pierde veracidad, lo importante es observar donde se ha producido y que concuerda con la zona fisurada y de tensiones máximas. También es interesante observar los valores de desplazamiento máximo en el extremo y en la fisura; 2,5 cm y 1,66 cm respectivamente para el estudio 1.1. Estos valores de desplazamientos son altos y por lo tanto a tener en cuenta ya que demuestran que el eje ha fracturado y quedará inutilizable.

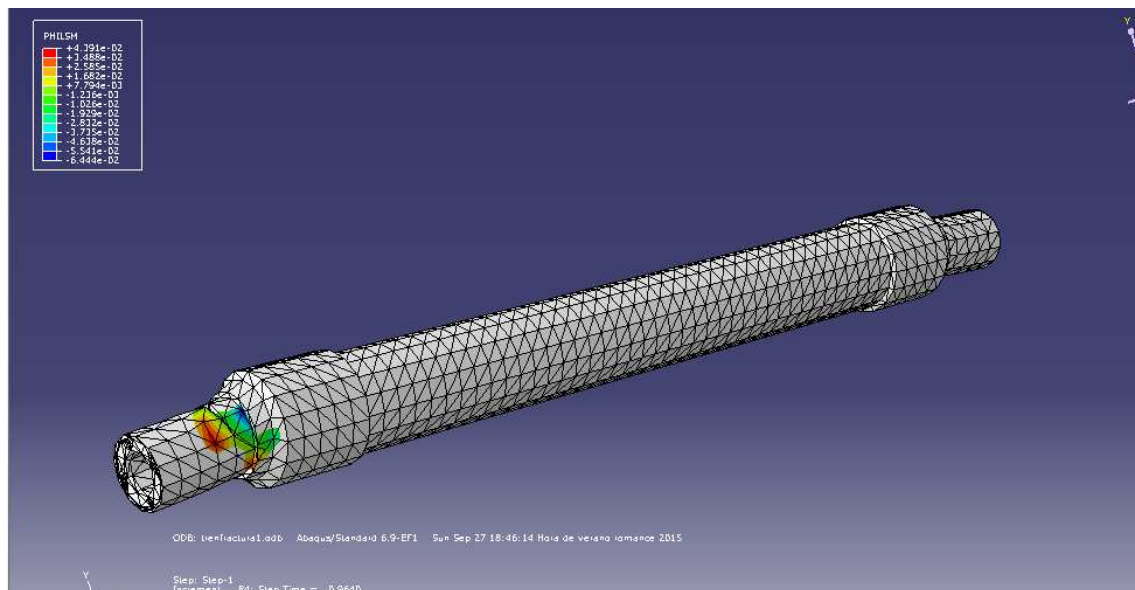


Fig. 67 – Propagación de grieta para eje con fisura en zona 1. Estudio 1.1

6.3.2. EJE CON FISURA EN ZONA 2

Tensión máxima

Los valores máximos de tensión para esta fisura, fisura 2, se reflejan en la figura 68

y figura 69 respectivamente, son los mismos valores para los tres estudios realizados en ella y coinciden con la zona de tensiones crítica, 347 MPa.

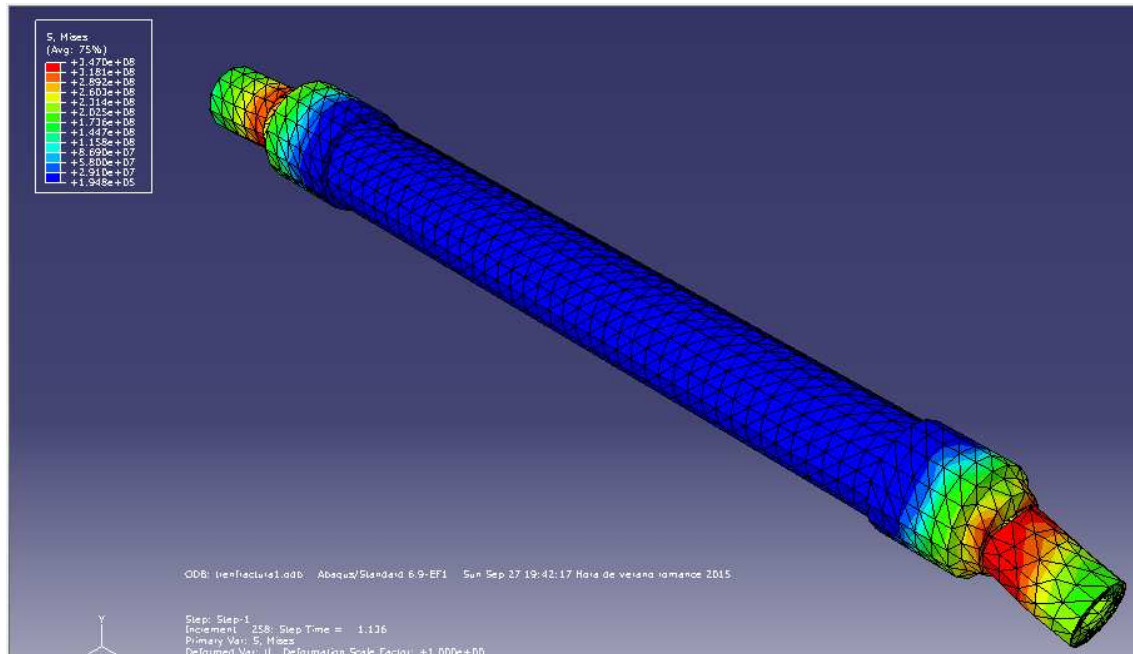


Fig. 68 – Tensión máxima para eje con fisura zona 2. Estudio 2.1

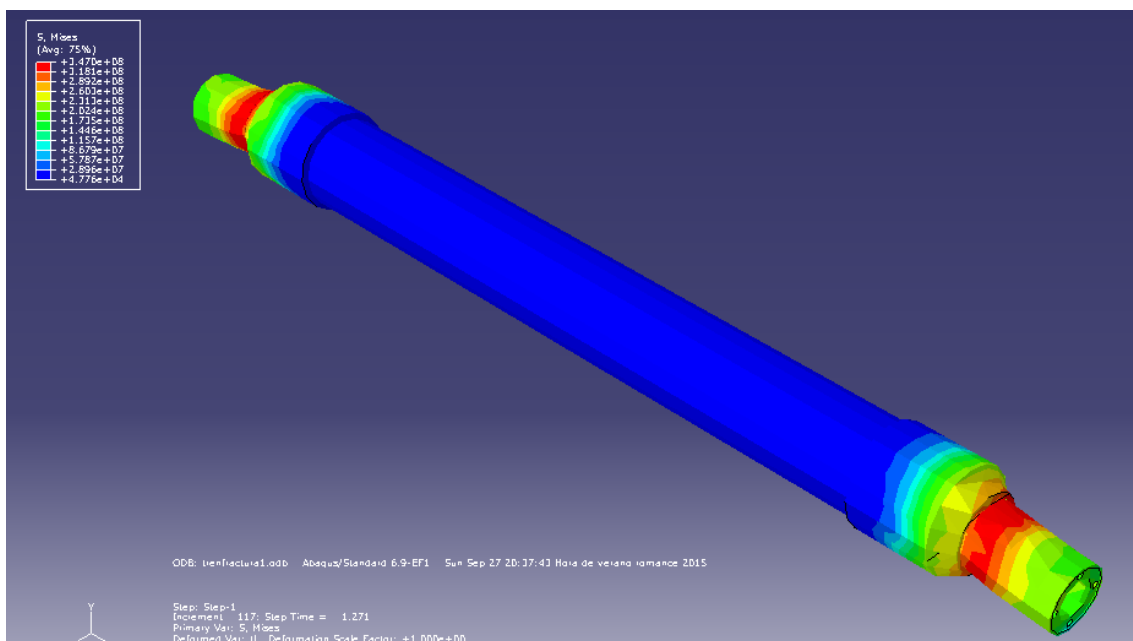


Fig. 69 – Tensión máxima para eje con fisura zona 2. Estudio 2.2

Grieta

Al coincidir la grieta en la zona de concentración de tensiones, se observa que la fractura se realiza en esa zona concreta, siendo el estudio donde las deformaciones son máximas.

Deformación máxima 6,76 cm.

Deformación en la sección crítica 3,94 cm.

Se puede observar en las siguientes figuras que el crecimiento de grieta se realiza en dicha zona.

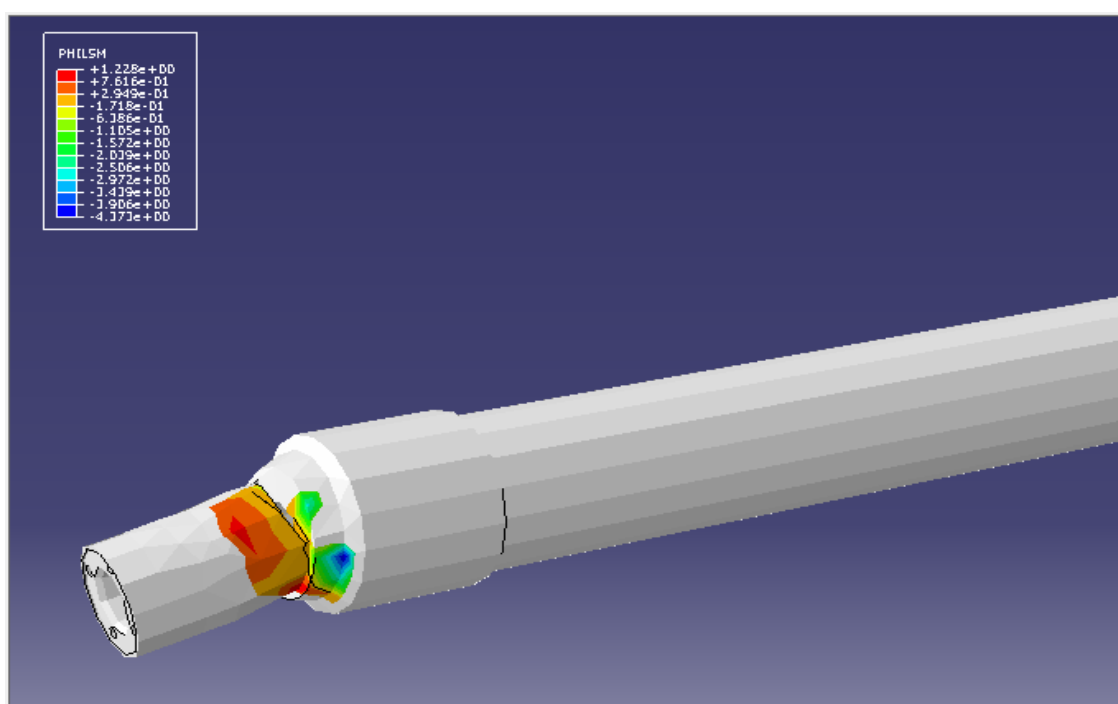


Fig. 70 – Propagación de grieta para eje con fisura zona 2. Estudio 2.1

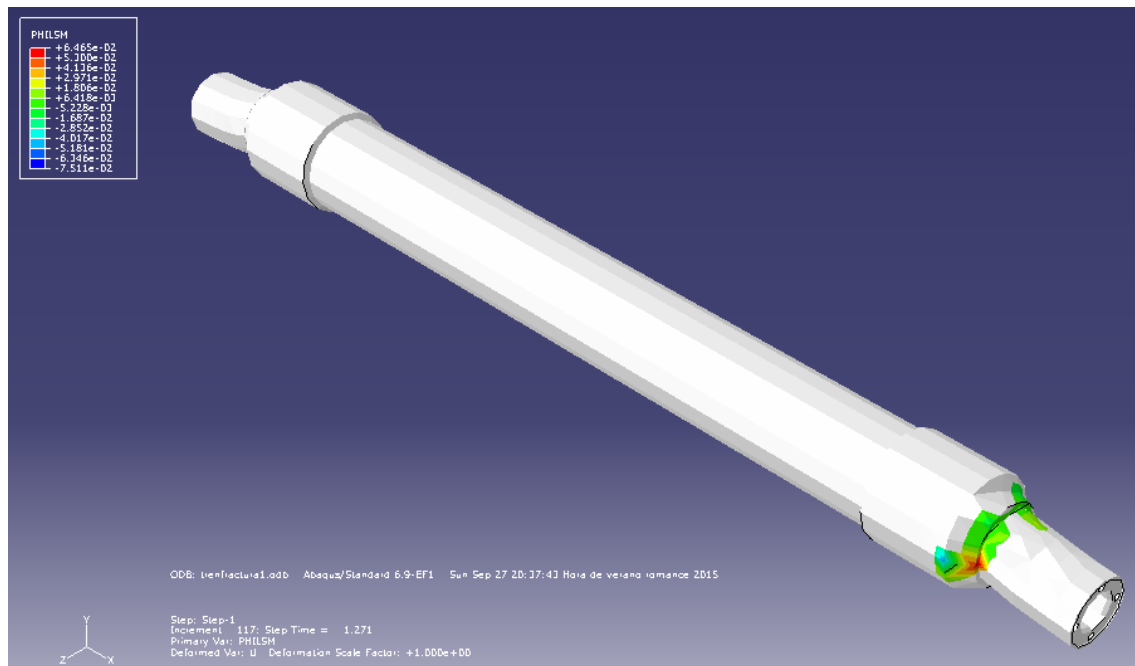


Fig. 71 – Propagación de grieta para eje con fisura zona 2. Estudio 2.2

6.3.3. EJE CON FISURA EN ZONA 3

Este caso de estudio es interesante ya que se sitúa en una zona proclive al inicio de la fatiga del eje.

Tensión máxima

Las tensiones máximas se sitúan en la superficie adyacente a la fisura, en el frente de grieta para los tres estudios, las tensiones son las tensiones de rotura salvo para el estudio 3.1, que converge con anterioridad debido fundamentalmente a la geometría generada tras la fisura.

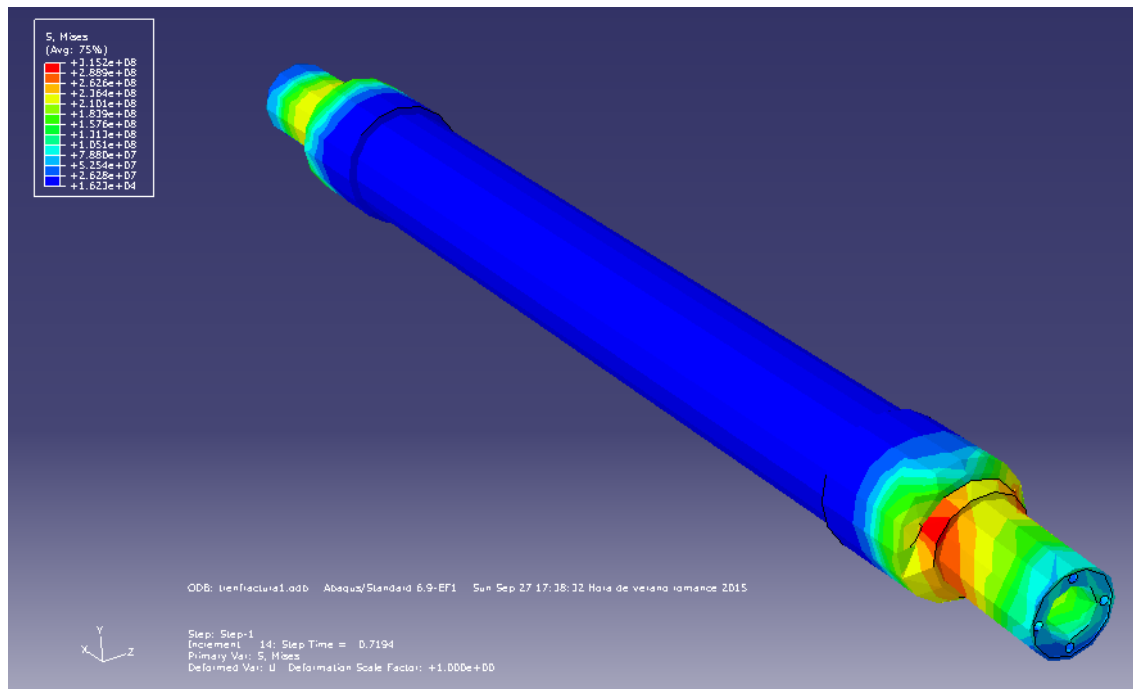


Fig. 72 – Tensión máxima para eje con fisura en zona 3. Estudio 3.1

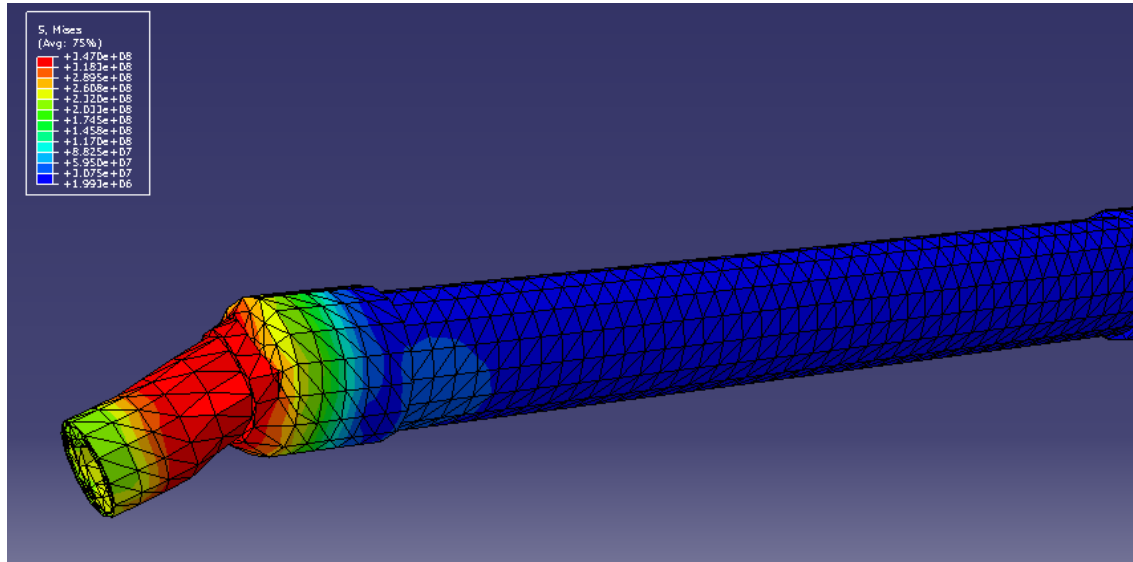


Fig. 73 – Tensión máxima para eje con fisura zona 3. Estudio 3.3

Grieta

Se representan las grietas generadas para el estudio en la zona 3, exactamente para la máxima y la mínima profundidad de grieta en las figuras 74 y 75.

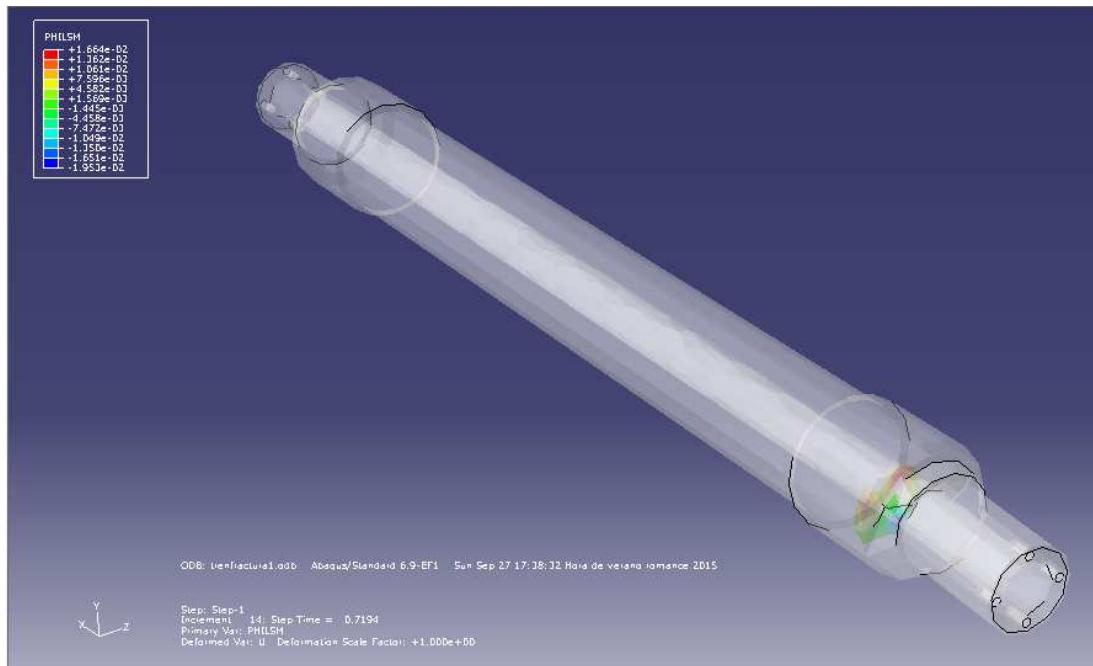


Fig. 74 – Propagación de grieta para eje con fisura zona 3. Estudio 3.1

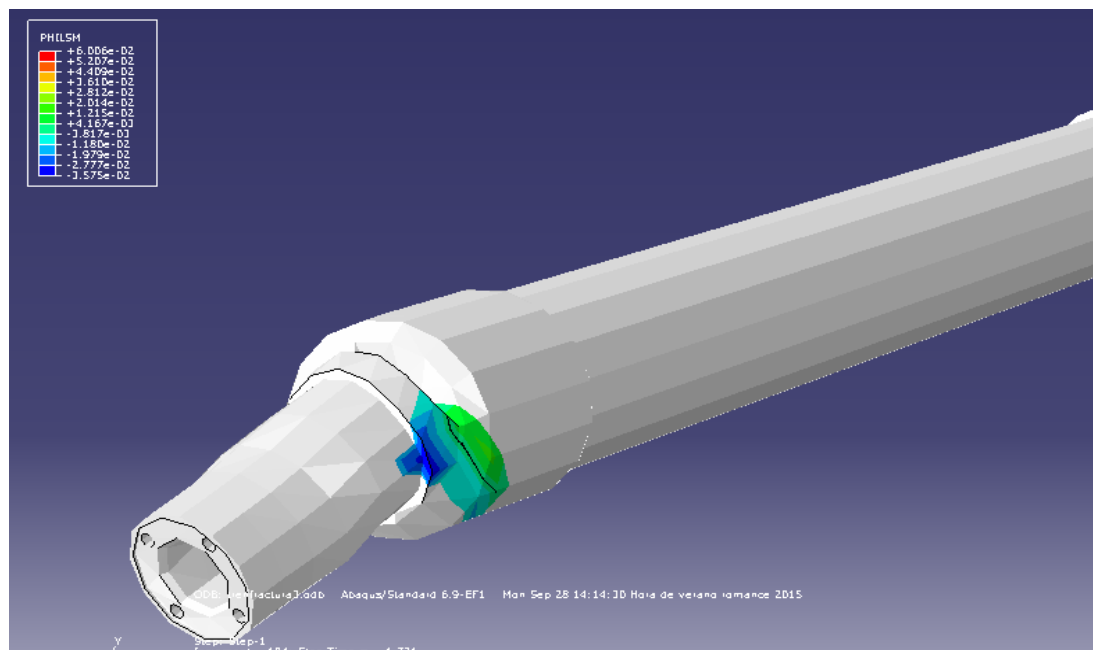


Fig. 75 – Propagación de grieta para eje con fisura zona 3. Estudio 3.3

6.3.4. EJE CON FISURA EN ZONA 4

Tensión máxima

Las tensiones en la zona fisurada son inferiores que en la zona crítica, la máxima se obtiene en el estudio 4.1 con 232 MPa.

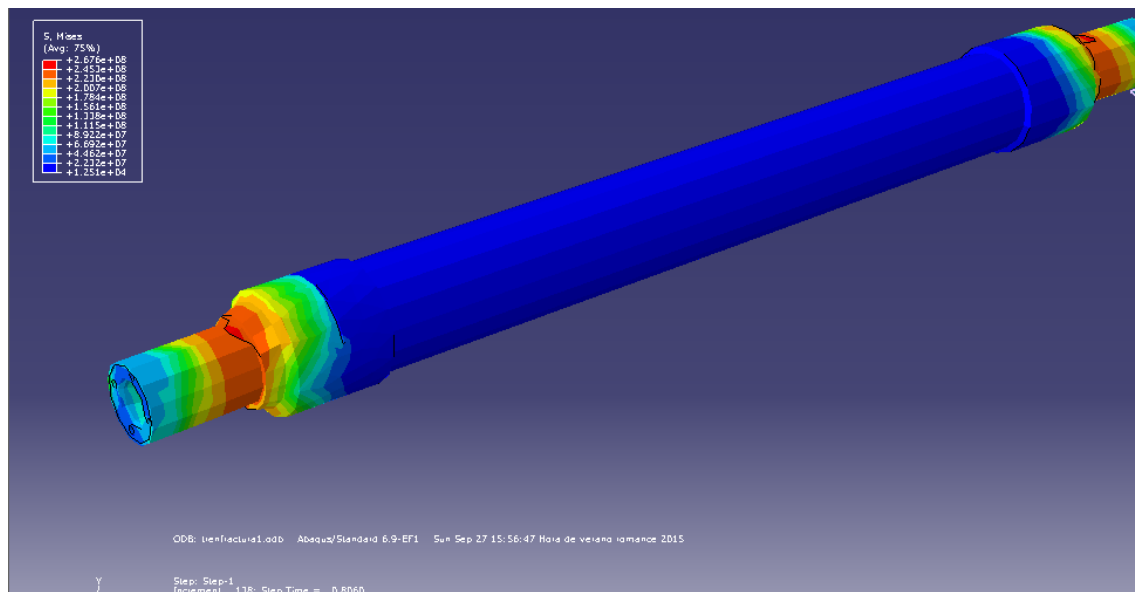


Fig. 76 – Tensión máxima para eje con fisura zona 4. Estudio 4.1

Grieta

El frente de grieta para la posición nº 4 se genera en la sección crítica y la deformación en la fisura es mínima.

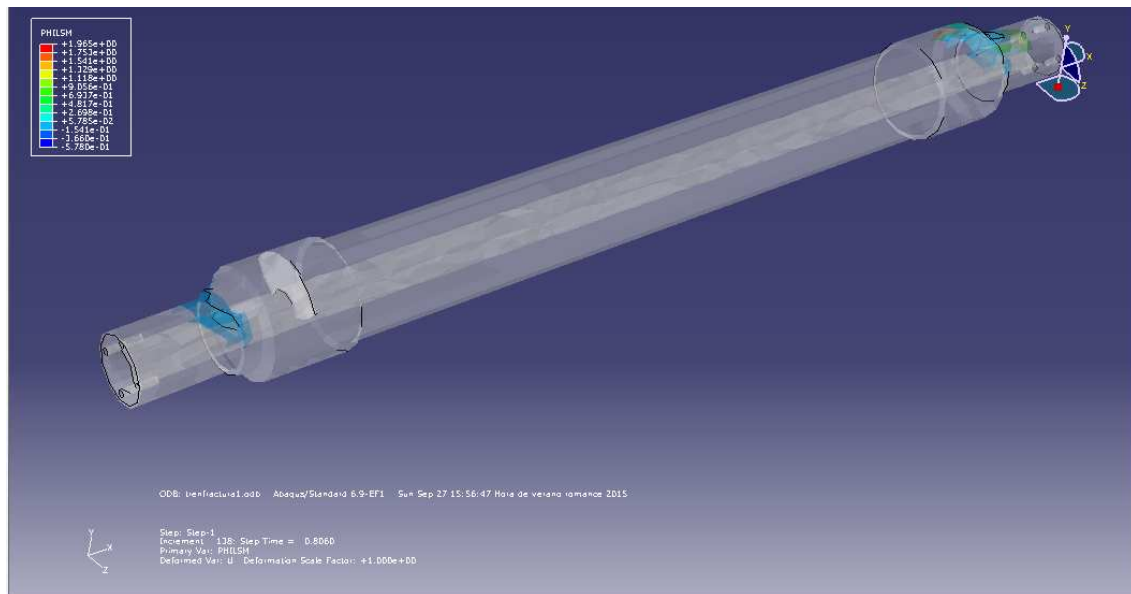


Fig. 77 – Propagación de grieta para eje con fisura zona 4. Estudio 4.1

6.3.5. EJE CON FISURA EN ZONA 5

Tensión máxima

Estudio con fisura realizado lejos de la zona crítica por lo que los resultados en grieta son poco relevantes, tensiones máximas en la zona fisurada de 108 KPa, lo que no compromete al material.

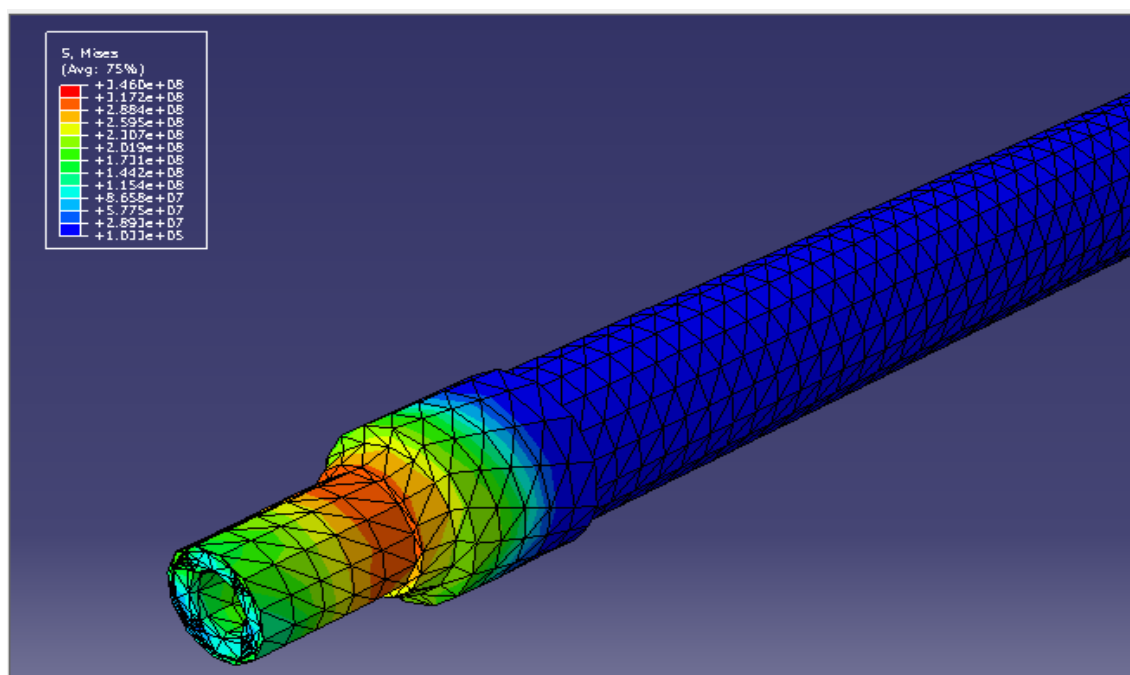


Fig. 78 – Tensión máxima para eje con fisura zona 5. Estudio 5.1

Grieta

La propagación de la grieta por el método XFEM se recoge cerca de la zona crítica y tiende a parecerse al estudio inicial sin fisuras. En la figura 79 se ha detallado la salida STATUSXFEM de fallo de material e inicio de falla en vez de la grieta, debido a que la convergencia en este estudio es más complicada.

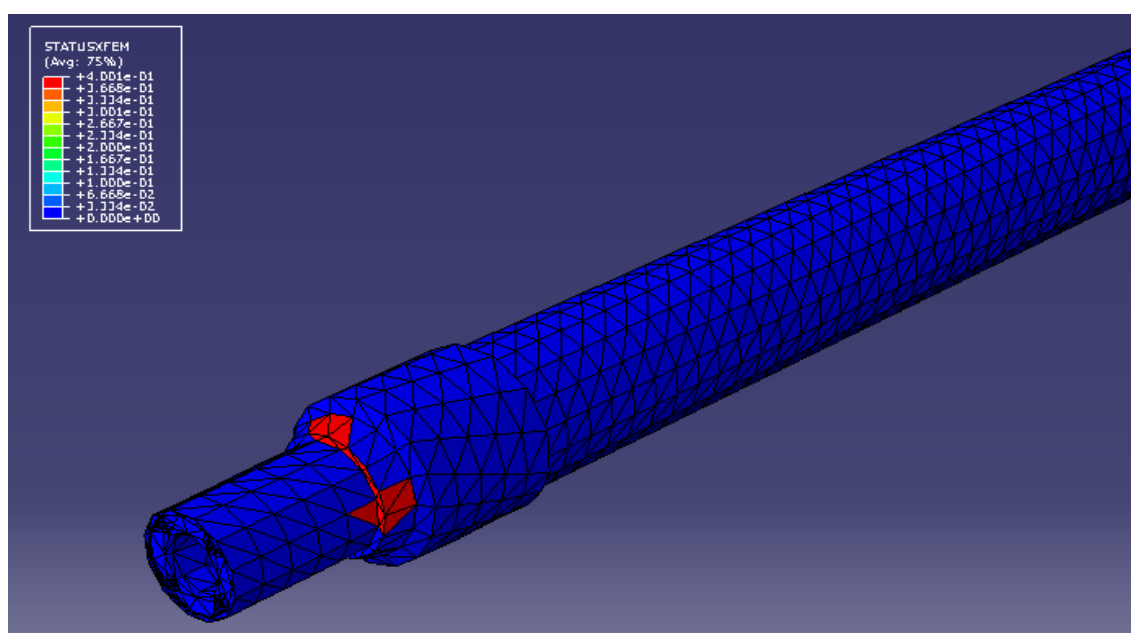


Fig. 79 – Propagación de grieta para eje con fisura zona 5. Estudio 5.1

Los valores de las tensiones en grieta y de las tensiones máximas en el eje, los desplazamientos en la fisura y los desplazamientos máximos de los 15 estudios se muestran a continuación en la tabla 8.

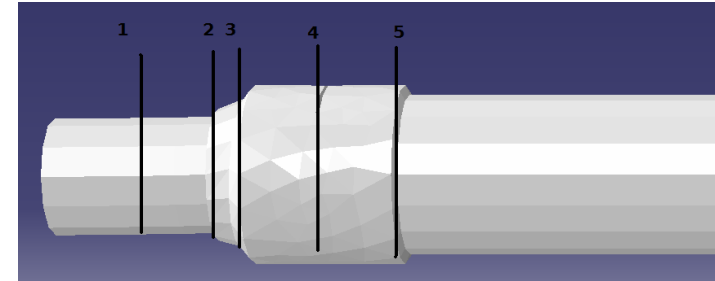


Tabla 8 – Resultados de las tensiones y deformaciones en los ensayos con grietas.

Zona	Estudio	Posición grieta eje Y (mm)	Tensión máxima (Pa)	Tensión en la fisura (Pa)	Posición de la grieta XFEM	Flecha Max (m)	Flecha fisura (m)
1	1.1	0	3,46E+08	3,46E+08	Zona fisurada	2,50E-02	1,66E-02
	1.2	40	2,58E+08	2,58E+08	Zona fisurada	1,85E-03	1,23E-03
	1.3	77,5	3,47E+08	3,47E+08	sección crítica	3,34E-02	5,50E-03
2	2.1	0	3,47E+08	3,47E+08	sección crítica/fractura	6,76E-02	3,94E-02
	2.2	40	3,47E+08	3,47E+08	sección crítica/fractura	3,11E-02	1,30E-02
	2.3	77,5	3,47E+08	3,47E+08	sección crítica/fractura	3,92E-02	1,32E-02
3	3.1	0	3,15E+08	3,15E+08	Zona fisurada	2,00E-02	1,34E-02
	3.2	40	3,47E+08	3,47E+08	Zona fisurada	3,20E-02	1,08E-02
	3.3	75	3,47E+08	3,47E+08	Zona fisurada	2,63E-02	6,56E-03
4	4.1	0	3,47E+08	2,32E+08	sección crítica	1,72E-02	4,37E-09
	4.2	40	2,13E+08	5,00E+07	sección crítica	1,70E-03	1,89E-08
	4.3	62,5	2,12E+08	4,00E+07	sección crítica	1,55E-03	2,15E-09
5	5.1	0	3,46E+08	1,08E+05	sección crítica	2,10E-02	2,47E-07
	5.2	40	3,46E+08	1,03E+05	sección crítica	1,03E-03	2,05E-09
	5.3	57,5	3,46E+08	1,03E+05	sección crítica	1,05E-03	1,85E-09

A continuación se va a realizar un análisis comparativo más visual de los resultados de la tabla anterior.

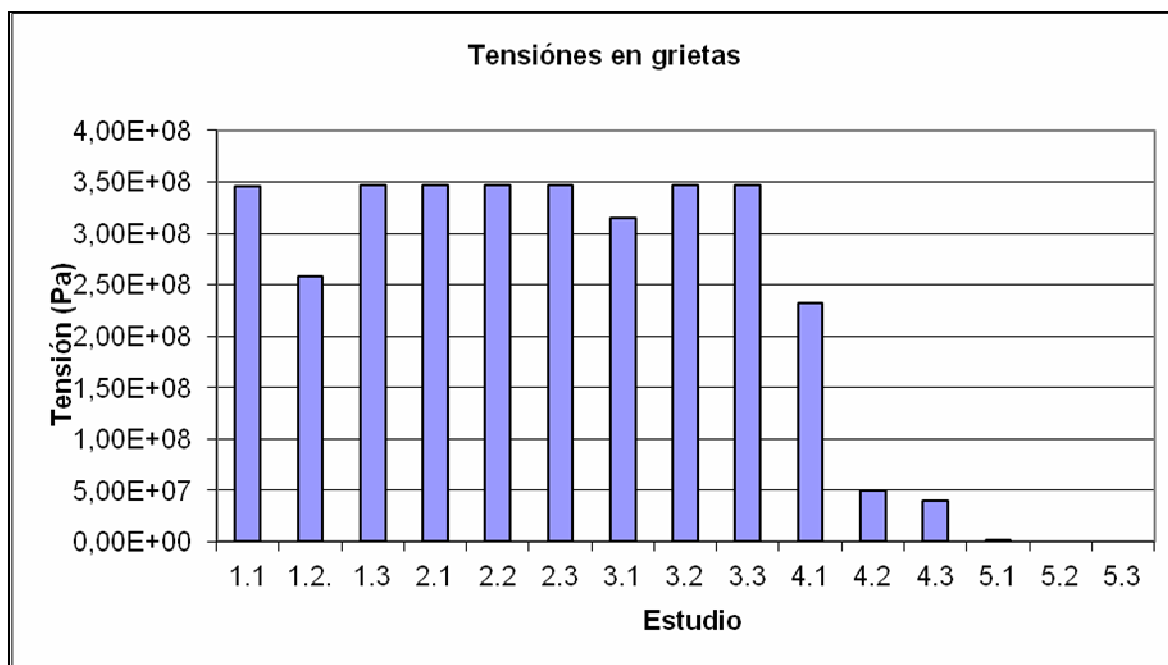


Fig. 80 – Tensiones máximas en grietas generadas.

En la figura 80 se observa que las tensiones máximas en grieta se producen en las fisuras que se localizan más cerca de la aplicación de carga, de los cambios de sección y de la zona más crítica. Disminuyen gradualmente cuanto más alejadas están de este punto y al disminuir la profundidad del frente de grieta.

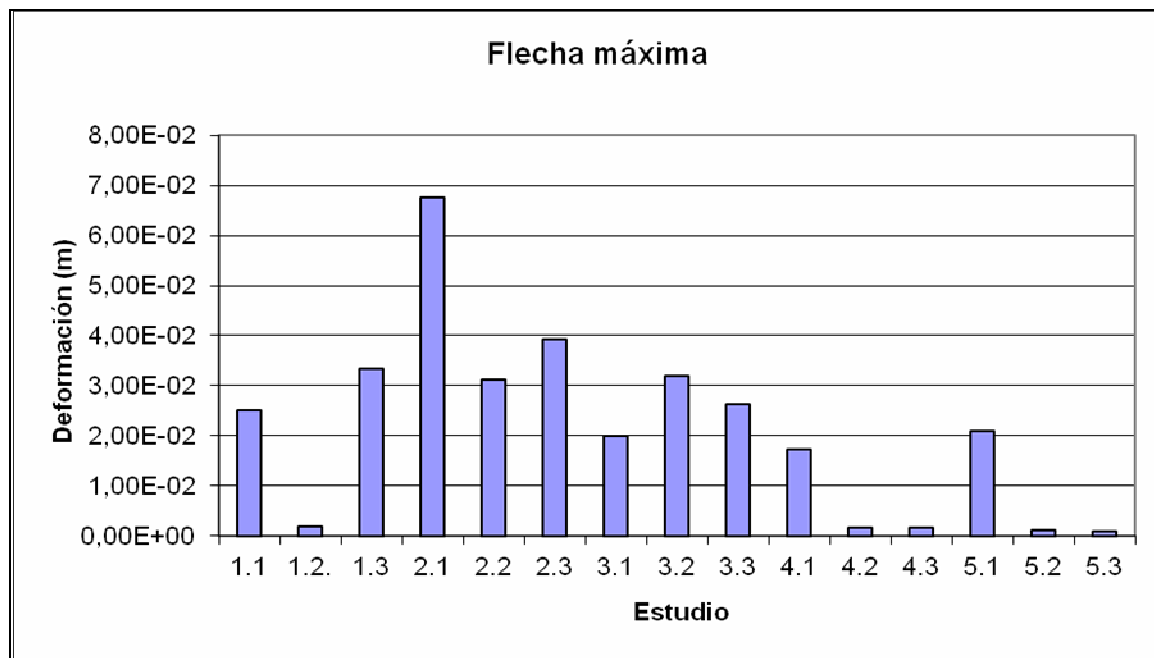


Fig. 81 – Deformación máxima del eje.

Las flechas máximas se obtienen en los extremos del eje, figura 81. En cuanto a los desplazamientos máximos en las grietas, los valores máximos se obtienen en aquellos análisis en los que es más profunda la fisura generada como se puede observar en la figura 82 donde además, sucede lo mismo que con las tensiones, que al distanciarse la fisura de la zona de cargas y diferencia de secciones, las flechas disminuyen.

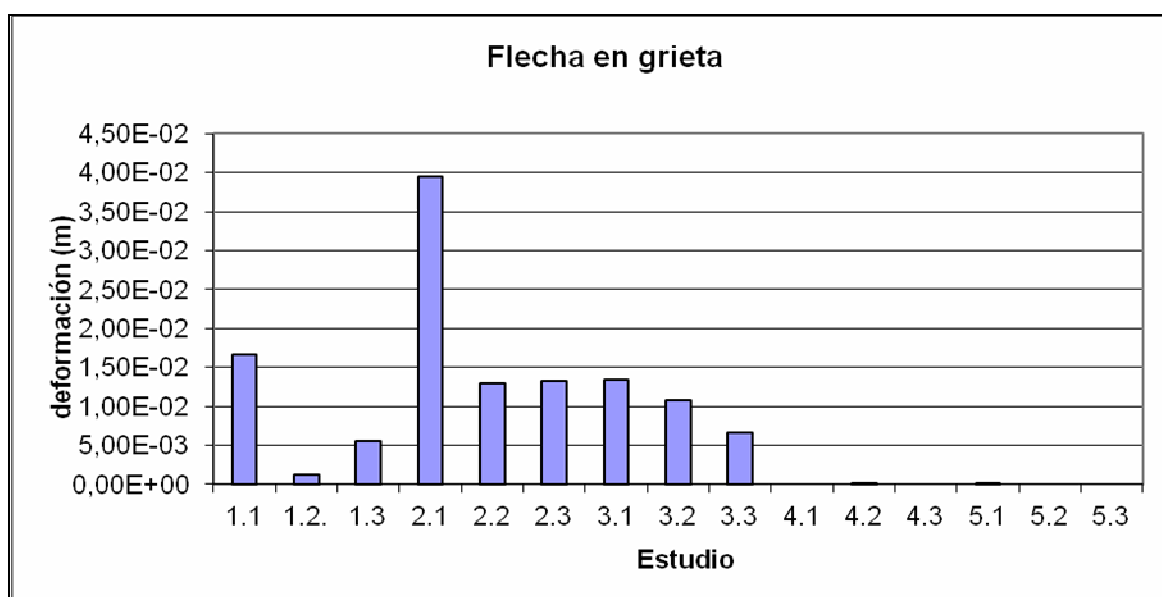


Fig. 82 – Deformación máxima en la grieta.

Las afirmaciones sobre desplazamientos hechas anteriormente son más visibles en las gráficas posteriores donde se comparan las flechas entre el extremo del eje, final del voladizo y zona de máxima deformación, y la generada en la fisura diseñada.

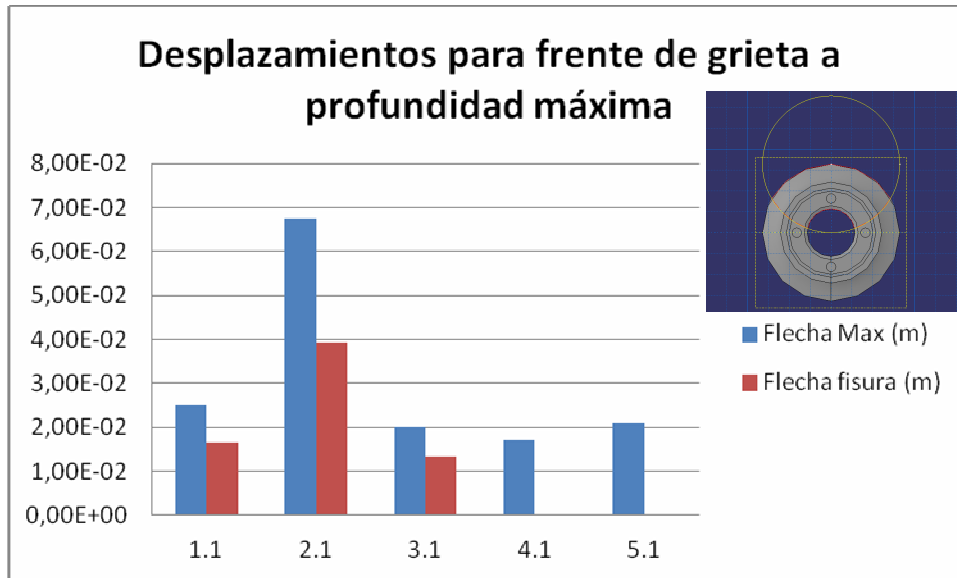


Fig. 83 – Desplazamientos para frente de grieta en coordenada (0,0).

Si se compara la figura 83, frente de grieta máxima, con la figura 84 y la figura 85, queda patente que a mayor profundidad, mayores son las deformaciones generadas.

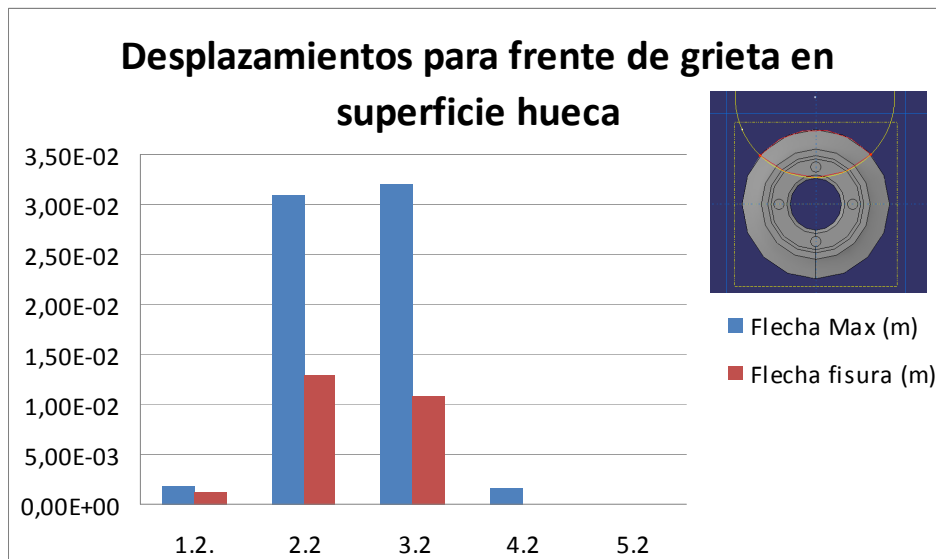


Fig. 84 – Desplazamientos para frente de grieta en coordenada Y 40 mm.

No ocurre lo mismo cuando se comparan los valores máximos de deformación tanto en el extremo como en la fisura, figura 84 – desplazamientos para frente de grieta en la superficie del hueco, y la figura 85- desplazamientos para frente de grieta en mitad de la corona. En estos casos, no se cumple que a mayor profundidad mayor sea la deformación generada, ya que, al ser un eje hueco, las tensiones se redistribuyen por la superficie.

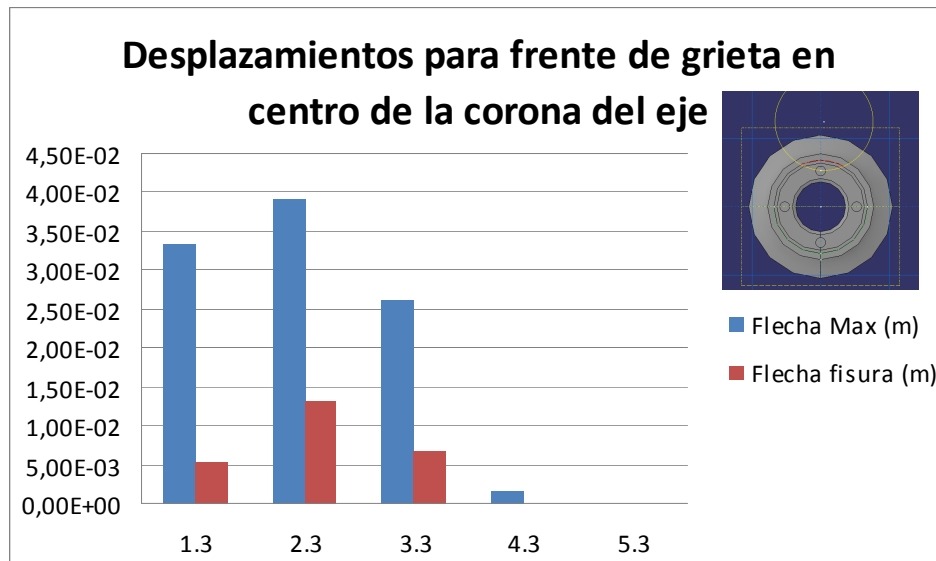


Fig. 85 – Desplazamiento para frente de grieta

También vuelve a quedar patente para los análisis de frente de grieta menos profundo, que los resultados para las fisuras más alejadas de las zonas críticas, es decir, para las zonas 4 y 5, son muy pequeños y apenas tienen repercusión, tanto, que sus valores aparecen como nulos en las gráficas.



7. CONCLUSIONES

Y

FUTUROS TRABAJOS

7.1. CONCLUSIONES

Al finalizar el presente proyecto, se puede afirmar que se ha cumplido el objetivo principal de este proyecto: crear un modelo de eje ferroviario hueco, de dimensiones reales, y estudiar la propagación de una grieta producida en la superficie del eje mediante la simulación de diferentes variaciones del modelo utilizando el Método de los Elementos Finitos, con el software ABAQUS.

También se puede confirmar que se han cumplidos los objetivos secundarios que se marcaron al principio del proyecto:

- Se ha realizado un manual de uso rápido del software ABAQUS con el fin de dar a futuros usuarios una herramienta útil de trabajo.
- Se propone un modelo de eje ferroviario hueco en ABAQUS, preparado para realizar un estudio de cargas estáticas.
- Se ha generado varios modelos posteriores de eje ferroviario con grietas en cinco posiciones y con tres profundidades diferentes.
- En los modelos de eje ferroviario con grieta se aplicó el método de análisis de inicio y propagación de grieta XFEM (permite el desarrollo de dicha grieta sin necesidad de definir el frente de grieta) con satisfactorios resultados.
- De los resultados de las simulaciones se concluyó que a mayor profundidad de grieta, mayores son las deformaciones generadas y que esta evolución es lineal.



7.2. FUTUROS TRABAJOS

Como ya se ha comentado, los estudios en ABAQUS sobre ejes ferroviarios no son muy comunes, a pesar de la potencia de cálculo del software.

Debido a esto, se ha intentado detallar cuidadosamente los pasos y características fundamentales del programa, tanto en lo correspondiente a diseño como a los análisis. Por ello también, se ha estudiado un caso primario de un eje de ferrocarril.

Por todas estas razones, a continuación, se muestra los posibles trabajos futuros que se pueden realizar a partir de los resultados obtenidos en este estudio:

- Perfeccionamiento de los diseños geométricos y redefinición de mallado para optimizar los cálculos de la herramienta empleada.
- Desarrollo de un modelo pormenorizado de un eje ferroviario figurado.
- Estudio de la influencia de la posición, así como de la forma y dimensiones, de una fisura simulada en la geometría del componente a fatiga.
- Estudio de la influencia de variaciones de materiales como recubrimientos, capas antioxidantes, etc.



8. PRESUPUESTO

8.1. PRESUPUESTO

El proceso de investigación y análisis realizado en este proyecto lleva unos costes asociados que, en este caso, al no tratarse de una iniciativa privada, han sido nulos, sin embargo, si se tratase de una iniciativa no educativa, habría que reflejarlos en su totalidad.

A continuación se van a detallar en el siguiente informe los costes directos que asumiría cualquier empresa a la hora de una investigación como la llevada a cabo. Es apreciable que los mayores costes están asociados a la adquisición de software para uso comercial, aunque cabe destacar que Dassault Systèmes posee una edición de dicho software para estudiantes totalmente gratuita pero con limitaciones de cálculo. El otro gran coste, superior tras la amortización, se asume de la mano de obra especializada.

Para hallar los costes que se dedican de esa licencia al proyecto, así como los gastos de equipo, se debe realizar una amortización de los mismos, para ello se seguirá la siguiente ecuación:

$$\text{Fórmula de la amortización: } (A / B) \cdot C \cdot D$$

A = nº de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado.

B = periodo de amortización (meses).

C = coste del equipo sin IVA (€).

D = % del uso del producto que se dedica al proyecto.

Los costes de personal se calculan sin necesidad de amortización, horas necesarias por el coste del trabajo realizado. Todo esto queda detallado en la tabla siguiente:

Tabla 9 - Presupuesto

EQUIPOS Y MATERIALES					
Concepto	Coste	Tiempo de utilización	% de uso	Periodo de amortización	Coste
Abaqus 6.9	6.500,00 €	4 meses	50	12 meses	1.383,3 €
Ordenador ASUS INTEL CORE™ 2 DUO T5750, 2.0 GHz, 4 GB RAM, T. G. Nvidia Geforce 500MB	599,99 €	6 meses	50	24 meses	75 €
Normas UNE	150,00 €				150,00 €
PERSONAL					
Concepto	Coste unitario	Tiempo de empleo			Coste Imputable
Horas de recopilación.	20 €	20 h			400 €
Horas de generación de modelos.	30 €	20 h			600€
Horas de generación del manual.	30 €	30 h			900€
Horas de ingeniería y análisis.	40 €	120 h			4.800 €
Total					8.308,3 €
Total (21% de impuestos incluidos)					10.053,04 €



9. REFERENCIAS



1. Apuntes de la asignatura Diseño de Máquinas – 2º de Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica – Universidad Carlos III de Madrid.
2. J. San Millán Fiel, I. J. Armendáriz, A. García Martínez, Salamanca, F. Martín de la Escalera, "Simulación por elementos finitos del comportamiento en tolerancia al daño de estructuras aeronáuticas". Octavo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (<http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/08/08-11.pdf>).
3. J.L. Arana J.J. Gonzalez, "Mecánica de Fractura" (2002), Publicaciones de la Universidad del País Vasco.
4. Y. Uzcátegui Flores. Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de los Andes. "ABAQUS PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS". Mérida (Venezuela).
http://www.cecalc.ula.ve/documentacion/tutoriales/abaqus/introduccion_abaqus.pdf
5. Dassault Systèmes. Simulia. "Abaqus/CAE User's Manual" & "Abaqus Analysis User's Manual".
6. Dassault Systèmes. Simulia. PRINCIPIA Ingenieros Consultores. "Modeling Fracture and Failure with Abaqus" (2006).
7. Gautam M. Puri. Python Scripts for Abaqus. Learn by Examples. 2012
8. UNE-EN13260. Junio 2004 / UNE-EN13261. Diciembre 2009.
9. ABAQUS XFEM Tutorial: 3D Edge, CrackMatthew Jon Pais, University of Florida (2010)
10. Sergio Fernández Matey. Análisis modal mediante CREO ELEMENTS/PRO de un eje ferroviario. Proyecto fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2013.
11. Eva Marco Esteban. Metodología para el análisis a fatiga mediante el código Pro Engineer: aplicación a un eje ferroviario. Proyecto fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2010.



ANEXO I

PLANOS



